

---

# Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

---

## La mesure : repères, problématiques et enjeux<sup>1</sup>

par Alain MARUANI  
ENST - 46, rue Barrault - 75634 Paris Cedex 13

---

### 1. LA MESURE À L’AFFICHE !

Dans *L’anglais qui gravit une colline mais descendit une montagne*, le réalisateur C. Monger raconte comment les paisibles habitants d’un village gallois situé au bas de la montagne virent en 1917 leur honneur terni par deux cartographes anglais : avec l’altitude mesurée par les trublions, la montagne n’était que colline ; à très peu près, mais colline quand même. L’inadmissible était franchi, il s’en suivit de grandes turbulences. Garante de la paix sociale, valorisée par les présupposés de l’observateur, la mesure révèle dans cette fable bien des aspects de la nature humaine. Poursuivons l’enquête.

- 
1. *N.D.L.R.* : Nous remercions l’auteur de nous avoir permis de diffuser ce texte, écrit à l’occasion des Entretiens de La Villette de 1996 et qui vient de paraître dans les Actes de ces Entretiens (Collection Documents, Actes et Rapport pour l’Éducation - CNDP). Voir rubrique «Nous avons lu» dans la deuxième partie de ce B.U.P.

## 2. UNE MARCHÉ ALÉATOIRE À TRAVERS QUELQUES REPÈRES

– *Linguistiques* : dans le langage usuel, nous rencontrons *mesure disciplinaire, mesurer son erreur, battre la mesure... être en mesure de* signifie le pouvoir d'agir sur les êtres et les choses ; l'être humain a réservé le terme de mensuration à son propre usage. D'autres métaphores créent, dans d'autres registres, d'autres polysémies : ce que la théorie mathématique de la mesure et la théorie quantique de la mesure partagent le mieux, c'est le mot. Une aussi forte inscription linguistique atteste d'une insistante présence.

– *Religieux ou mythiques* : dans les religions révélées, la mesure, élément central de la création du monde, permet la relation au Sacré ; Metatron, la figure de Dieu qui pose la limite entre la divinité et l'humanité, arpente le Monde. La balance, attribut de la divinité, pèse les âmes. Un courant kabbalistique a détaillé les dimensions du corps de Dieu, en une avalanche de nombres extravagants dont le premier effet est de rendre la description parfaitement inintelligible. Avec des buts sans doute différents, bien des personnages utilisent ce stratagème pour noyer sous un déluge de nombres des réalités qu'ils veulent occulter ou travestir.

– *Historiques* : il semble que la mesure soit très tôt apparue dans l'histoire de l'humanité, peut-être depuis vingt-cinq mille ans. On sait que les astrologues établirent des premiers repérages dans le ciel sumérien et que les nilomètres d'Égypte, plus ou moins remplis par les crues du fleuve, furent utilisés pendant des millénaires. Rapporté en Ionie par Thalès, ce savoir antique fut à l'origine du «miraculeux» développement de la science grecque. La mesure du méridien terrestre par Ératosthène<sup>2</sup> peut ainsi être considérée comme un chef-d'œuvre absolu. Au moment de l'incendie de la bibliothèque d'Alexandrie, l'astronomie quantitative avait déjà été fondée, riche d'un catalogue d'au moins huit cent cinquante étoiles.

Bien plus tard, le contrôle de la monnaie par l'État donna un essor à la recherche de la précision dans les balances. Les *Tables Alphonsines* de la Renaissance couronnèrent un important travail de recensement des objets célestes et au XVII<sup>e</sup> siècle, la pensée scientifique connut une

---

2. Par comparaison des longueurs de l'ombre portée de gnomons situés sur le méridien d'Alexandrie.

percée décisive, grâce en particulier aux observations de Brahé, Kepler et Galilée. L'invention de la lunette, de l'oculaire, l'utilisation de réticule illustrent parfaitement la réflexion de Lord Kelvin : *Le contenu d'une expérience est d'autant plus riche que les mesures qui en sont la base sont plus exactes ; il s'ensuit que le progrès de la connaissance est lié, de façon la plus étroite, au degré de perfection des instruments et de la technique de mesure.*

– *Sociaux* : le code d'Hammourabi fonde la loi du talion, qui concerne la répartition d'un dommage. En l'absence de cette loi, force est de considérer le dommage comme global, portant atteinte à l'intégrité de la personne ; il ne peut s'en suivre que la restitution *ad integrum* de l'état antérieur, ou la mort de l'agresseur (et de fait, jusqu'à récemment, la mort pouvait condamner le contrevenant). En nommant et donc en *délimitant* l'agression, on donne une limite au dédommagement et c'est un premier pas vers le juridique, moyen de coexistence. Il s'agit ensuite de trouver la bonne mesure, qui permettra d'assécher le conflit, sans pour autant l'annuler.

### 3. UBIQUITÉ

Il n'est guère d'activité humaine qui ait résisté au nombre et à la mesure. Une grandeur est *mesurable* lorsqu'une algèbre est possible sur les nombres qui la décrivent : on sait additionner deux longueurs, ou multiplier une longueur par un nombre. Dans le cas contraire, la grandeur est dite *repérable* : la somme de deux températures n'est pas une opération physiquement réalisable. Il existe enfin une profusion d'*indicateurs*, le plus souvent subjectifs. Les progrès du savoir permettent d'enrichir chaque jour la liste des quantités objectives que l'on peut associer à des notions qualitatives, par exemple, l'arôme, ou le stress ; la question se pose, naturellement, de savoir si tout, en fin de compte, est susceptible de se laisser complètement décrire par des nombres. Au nom d'une épistémologie réaliste intransigeante, la certitude est proclamée ici ou ailleurs, que l'intelligence, par exemple, sera un jour mesurable. La conviction que les facultés poétiques ou esthétiques seront longtemps réfractaires à la numérisation est, pour l'auteur de ces lignes, une perspective vraisemblable. N'est-il pas plus approprié de parler d'un amour infini, ou éternel (noter le caractère spatio-temporel) que d'un amour d'intensité 9 selon tel axe, à dix niveaux, de la nouvelle carte du Tendre ?

C'est dans les sciences physico-chimiques et les sciences de la Vie et de la Terre que la mesure est évidemment la plus sollicitée. Après avoir salué au passage cette ingénieuse machine qu'est le corps humain<sup>3</sup>, confrontons plutôt les statuts respectifs de la mesure dans ces sciences et dans les sciences économiques et sociales.

Le paysage change, par endroit, du tout au tout. Est-il imaginable que soit annoncé quotidiennement un changement, par exemple, de l'étalon de masse ? Or, l'étalon monétaire est lui-même sur le marché monétaire et il existe un marché à terme du taux d'intérêt du prix de l'étalon ! Se greffe là-dessus le problème de l'information statistique. La loi économique est macroscopique mais ses fondements sont microscopiques (les comportements). L'agrégat des comportements pose le problème du changement de niveau, magistralement formulé jadis par Eubulide : au bout de combien de grains de sable obtient-on un tas de sable ? Si la question n'a pas de réponse, c'est qu'elle est mal posée. En sciences sociales, les grandeurs et les relations entre elles sont en grande partie déterminées par la méthode utilisée à chaque phase de l'étude. Les présupposés ou les affirmations idéologiques sont ici plus visibles qu'ailleurs, ce qui ne signifie pas qu'ailleurs de tels éléments soient absents.

#### 4. STATUT

L'existence même de la mesure est un signe de confiance dans l'intelligibilité de la Nature. On attend des résultats fidélité, justesse (pas de décalage systématique) et précision (pas de dispersion des mesures). On conviendra que calibrages et corrections font partie de l'expérience. Un résultat est exprimé initialement par un ou deux nombres (dans ce dernier cas, la seconde donnée est l'incertitude)<sup>4</sup>, mais il est fréquent que le résultat soit plus complexe : une courbe tracée est en réalité constituée d'une infinité de points, la détermination des paramètres d'une courbe dont on connaît la forme générale<sup>5</sup> permet l'économie d'une infinité de vérifications. Le résultat peut être aussi

---

3. Composée à 60 % eau salée à 9/1 000, mais avec, notamment, un réseau de capteurs autoréparables à la densité insurpassable.

4. *Exemple* : la longueur d'une fraction de méridien terrestre et son encadrement.

5. *Exemple* : la valeur moyenne et l'écart type d'une distribution donnée de probabilité.

une affirmation d'existence<sup>6</sup> voire un jugement<sup>7</sup>. Le montage expérimental peut mettre en œuvre, pour la même grandeur physique, mais selon l'ordre de grandeur et la nature du résultat escompté, des méthodes de mesure contrastées et des théories extrêmement diverses. La détection du rayonnement électromagnétique illustre bien ce point.

## 5. TRANSDUCTEURS, TRAITEMENT DE DONNÉES

Une grandeur physique est rarement accessible directement. Un transducteur, ou capteur, est un dispositif convertissant cette grandeur en une grandeur qui la représente, et qui est d'accès immédiat. Il est souhaitable que le principe de fonctionnement de l'appareil de mesure soit aussi différent que possible du principe régissant le système étudié. Un exemple de cette situation est constitué par l'effet Hall quantique (EHQ), dans lequel une mesure de magnéto-résistance à basse température dans une microstructure donne un accès à la constante de structure fine. Cette constante joue un rôle décisif en électrodynamique quantique (EdQ). On pourrait objecter que l'électrodynamique quantique est le substrat de toute théorie. Certes. Mais la «distance» EHQ-EdQ est supérieur, par exemple, à la distance entre le thermomètre à la dilatation et le système dont il repère la température et dans lequel il est plongé<sup>8</sup>. Les capteurs qui n'interfèrent pas directement avec le dispositif étudié ont un statut privilégié. Par exemple, on peut mesurer le débit de fluides contenant des particules chargées en considérant la force électromotrice induite dans un circuit au voisinage de ces particules. Depuis peu se développe l'usage du *capteur intelligent*. Il n'y a pas ici plus d'intelligence que celle qui peut émaner de lignes de code. Avec la généralisation des techniques numériques, l'acquisition est ici enrichie de traitement de signal et de communication avec une base de données, avec des superviseurs et des actionneurs.

### 5.1. Erreurs et inconsistances : problèmes mal posés

Un problème est dit *mal posé* lorsque l'on pense qu'il a une solution unique et que les données sont insuffisantes<sup>9</sup> ou surabondantes

6. *Exemple* : une nouvelle comète.

7. *Exemple* : la théorie A est préférable à la théorie B.

8. Cette distance n'a pour le moment d'autre contenu que qualitatif.

9. *Exemple* : trouver deux nombres de somme 3.

et contradictoires<sup>10</sup> pour qu'on puisse exhiber cette solution. Le problème mal posé est le lot quotidien de la mesure. Un saut conceptuel remarquable a été accompli par Gauss, dans sa théorie des incertitudes, dont on mentionne le mode opératoire très tôt dans l'enseignement. Il est habituel de décider que le résultat d'une série d'observations effectuées dans des conditions analogues sera la moyenne des divers résultats. Mais n'est-il pas surprenant de trouver des résultats différents sur le même objet ? En réalité, les sources d'écart sont à trouver dans la variabilité de l'objet lui-même, celle du système de mesure et celle de l'observateur, en supposant ces trois éléments séparables. Prendre la moyenne consiste à remplacer par la pensée le système réel, unique, par un ensemble de systèmes analogues, dont on cherche le représentant moyen. Quand les élèves de la classe donnent des résultats dispersés sur la mesure (le mesurage) de la même masse, la moyenne représente la performance de l'élève prototype ; ce changement subreptice de point de vue est nécessaire pour se rapprocher des conditions d'applicabilité de cette mystérieuse et subtile loi des grands nombres, si souvent invoquée et si rarement énoncée.

## 5.2. Insuffisances : inférence et théorie de la confirmation

Plus des résultats sont conformes à un modèle, plus le crédit que nous accordons à ce dernier augmente. Comment modifier nos conclusions au fur et à mesure que les données s'accumulent ? Est-il possible de mettre un nombre sur la confiance accordée à un modèle ? Pourquoi pensons-nous que des expériences indépendantes confortent mieux un modèle donné que la répétition inlassable de la même expérience ? Duhem objectait que l'on pût déduire les lois de Newton de l'observation du mouvement des planètes : les orbites ne sont pas elliptiques ! Cette objection avait été balayée par Newton lui-même qui avait observé que deux révolutions ne sont jamais identiques. Les degrés de croyance ne sont ni logiques ni objectifs ; ils relèvent des lois de probabilité et du pari. Il est naturel de poser que le crédit accordé à une hypothèse après l'acquisition de données expérimentales (probabilité *a posteriori*) est proportionnelle au produit de deux termes : d'une part la vraisemblance de cette hypothèse, d'autre part la probabilité d'obtenir ces résultats expérimentaux, en tenant l'hypothèse pour vraie (probabilité *a priori*).

---

10. *Exemple* : plusieurs mesures sur le même objet donnent des résultats dispersés.

Plus précisément, le *principe d'inférence de Bayes*, d'illusoire évidence, affirme que<sup>11</sup> :

$$P(H \text{ et } e) = P(H|e) = P(e|H) \times P(H)$$

A partir de cette relation (qui a engendré des milliers d'articles), il est possible d'élaborer une réponse quantitative aux questions posées au début de ce paragraphe. On peut rationaliser de même la raison pour laquelle des résultats de double diffraction électronique contredisant apparemment les prédictions de la théorie relativiste de Dirac n'ont pas entraîné une remise en cause de cette équation ; cette dernière se révèle robuste par rapport à une différence entre le résultat obtenu et le résultat ici attendu. On peut rêver (et c'est l'exigence de certains penseurs) de ranger la science en un ensemble de théories exclusives et exhaustives. De manière plus immédiatement opérationnelle, les méthodes bayésiennes sont d'un usage permanent en plusieurs domaines, particulièrement celui du traitement d'image.

Lorsque, enfin, les données sont insuffisantes pour construire une représentation complète d'une situation, le praticien est mis en demeure d'inventer les données manquantes. L'interpolation est un exemple simple de cette procédure. Des considérations entropiques, c'est-à-dire traduisant mathématiquement le principe d'ignorance maximale sont souvent ici d'une aide précieuse. Considérons pour le voir un lancé de boules dans des tonneaux ; après  $M$  tirs, il y a  $n_1$  boules dans le tonneau n° 1,  $n_2$  boules dans le tonneau n° 2 et ainsi de suite. Si le lanceur n'a pas de préférence et s'il effectue un nombre de tirs très élevé, on établit que la probabilité  $P(n_1, n_2, \dots)$  d'obtenir la répartition indiquée ci-avant est proportionnelle à :

$$\exp \left[ C^{\text{te}} \times S \left( \frac{n_1}{M}, \frac{n_2}{M} \dots \right) \right]$$

où la fonction  $S$  est l'*entropie* du système étudié. On en connaît l'expression analytique. Vraisemblablement, on observera la configuration la plus probable, donc celle qui correspondra au maximum d'entropie ( $C^{\text{te}} > 0$ )<sup>12</sup>. Ce *principe d'entropie maximale*, éventuellement

11. On note  $P(a)$  la probabilité d'avoir  $a$ ,  $P(a|b)$  la probabilité d'avoir  $a$  sachant  $b$ ,  $H$  une hypothèse et  $e$  des données.

12. Dans le cas considéré, on trouve, sans surprise,  $n_1 = n_2 = \dots$

associé à des méthodes bayésiennes, permet d'obtenir des résultats pratiques largement non triviaux.

Le traitement de données est en fin de compte la conversion de données en conclusion sur le monde physique.

## 6. MÉTROLOGIE

Tout en étant une activité autonome, la mesure n'est pas une fin en soi. La science de la mesure dépasse le cadre de la physique expérimentale. Cette science fournit, maintient et propose un jeu cohérent d'unités. Ces dernières sont matérialisées par des *artefacts* préservés en des endroits immunes aux perturbations (le mètre étalon, naguère), ou définies par la mise en œuvre des lois physiques (distance parcourue dans le vide par la lumière, boson de masse nulle pendant la durée  $\frac{1}{c}$ ). Les unités sont ainsi reliées entre elles par les lois de la physique et il en va de même des constantes physiques. Ces constantes proviennent des théories physiques ( $h, \dots$ ), des particules fondamentales ( $e, m_e, \dots$ ), ou de facteurs de conversion ( $g, \dots$ ).

Le raffinement des valeurs numériques entraîne souvent une complexification de la mesure, ou de la théorie sous-jacente, ou des deux à la fois ; par exemple, le mètre a longtemps été comparé à un étalon, ce qui était conceptuellement simple, même si la mise en œuvre était lourde. Aujourd'hui, l'interférométrie exige la maîtrise d'un nombre élevé de *senseurs* et de méthodes élaborées de *traitement de signal*. La métrologie inclut les points suivants :

- confronter des théories et des expériences,
- comparer des théories entre elles,
- explorer des nouvelles technologies de mesure.

La «course à la décimale suivante» a, elle aussi, des enjeux pratiques et théoriques d'intérêt élevé ; par exemple la mesure de la pollution de l'air exige la détermination fine des niveaux excités d'atomes ou de molécules ; l'espoir que l'inattendu se tapit derrière la dernière décimale est un moteur puissant d'investigation.

- un quatrième intérêt est de fournir un jeu cohérent de valeurs numériques. Le travail d'ajustement effectué en 1986 constitue un effort important en ce sens. Il est avantageux de relier des constantes

fondamentales par des ponts théoriques (quelquefois inattendus), suggérant de nouvelles expériences. Par exemple, la jonction Josephson permet de déduire le rapport  $\frac{e}{h}$  de mesures de tensions et de fréquences.

Les constantes naissent, vivent et meurent. L'équivalent mécanique de la calorie a vécu en tant que constante, mais on le retrouve, dissimulé derrière la chaleur massique de l'eau, ou ressuscité dans les étiquettes de produits de régime (un régime *hypoénergétique* est dit *hypocalorique* et pas *hypojoulique*). Peut-on supprimer la vitesse de la lumière en tant que constante fondamentale, et mesurer les intervalles de temps et les distances avec la même unité, la seconde ? Le débat semble ouvert. L'année de lumière répond positivement à la question posée. Mais qui est prêt à dire, aujourd'hui : «*habitant à 67 microsecondes d'ici, j'ai mis une heure pour y arriver*» ?

## 7. ARTICULATION EXPÉRIENCE-THÉORIE

La physique a un langage propre et son contenu est exprimé par des grandeurs, indépendamment des valeurs particulières prises par celles-ci. Le langage mathématique donne plus que de la précision au contenu des propositions de la physique : il est naturellement associé à celui de la physique dans l'édification de la science ; l'articulation entre théorie et expérimentation est en réalité réciproque. Le support théorique indique de quel côté aller chercher<sup>13</sup> ; il permet aussi de déclarer qu'une expérience est finie, la limite ultime de résolution *du dispositif et de la méthode* ayant été atteintes. Parallèlement, un résultat expérimental peut conforter ou réfuter une théorie, ou susciter par sa nouveauté un regard original sur le monde. Le statut imaginaire des expériences est paradoxal. Par exemple l'expérience de Michelson et Morley, donnant une borne supérieure à la vitesse du vent d'éther est universellement célèbre ; on l'associe à l'édification de la réalité. Mais qu'en est-il de l'expérience de Lummer et Pringsheim (1900) ? C'est l'une des plus importantes expériences du vingtième siècle, puisque, révélant l'écart du spectre d'émission du corps noir par rapport à la loi de Wien, elle ouvrait la porte au travail de Planck, pierre angulaire de la mécanique quantique.

---

13. Par exemple, la position de Neptune, à partir de mesures et de calculs sur Uranus.

Le regard porté par les praticiens sur leurs propres productions est également riche d'enseignements sur les registres de fonctionnement de la science et donc de l'être humain. Les questions qui, explicitement ou implicitement, hantent les laboratoires incluent :

Quels sont les rôles réel et idéal de l'expérience ? D'où vient que nous croyions les résultats publiés et plus généralement quels sont les critères de scientificité d'un écrit ? Comment séparons-nous un résultat issu d'un appareil d'un *artefact* créé par le dispositif expérimental ? La longue polémique entre Lakatos (question de logique) et Feyerabend (question de propagande) confirme que le traitement d'un résultat de mesure n'est pas indépendant d'attitudes sociologique et psychologique. Quelques exemples seront peut-être ici plus instructifs qu'une formulation abstraite :

La «cinquième force», annoncée, mesurée, théorisée et finalement réfutée par la mesure et par la théorie a donné lieu à des recherches expérimentales compréhensibles au niveau de la licence. L'interféromètre de Sagnac, réalisation impeccable, à l'origine de dispositifs d'un usage aujourd'hui courant, se présentait à l'origine comme apportant une preuve de l'existence et comme une caractérisation du vent d'éther.

Les expériences de Wu, Garwin et d'autres (1957), à partir des indications de Lee et Yang, ont confirmé la non conservation de la parité dans les interactions faibles, mais, dès 1930, Cox et Chase avaient publié des résultats révélant ce dernier phénomène ; préoccupés de diffusion électronique, ces derniers ne s'intéressaient au déclin  $\beta$  (signature des interactions faibles) qu'en tant que source d'électrons. Helmholtz avait formalisé au siècle précédent l'*inférence inconsciente*, qui implique en particulier que l'on ne voit que ce qu'on s'attend à voir.

Hasardons la conjecture que l'histoire des non-découvertes pourrait égaler en richesse celle des découvertes.

Histoire réciproque de la précédente : la détection du spectre de bruit électromagnétique dans l'Univers est un problème en soi. Mais les mêmes données d'intensité spectrale se lisent aussi bien comme des indications précieuses sur l'âge de l'Univers et une expérience qui n'était que du grand art devient ainsi une «expérience Nobel».

Ce *distinguo* entre bruit, signal et signal parasite constitue dans la pratique une interrogation quotidienne ; en voici une illustration élémentaire : devisant avec un ami sur le quai du métro, j'entends le train qui s'approche, c'est un signal, je me prépare. Le train entre en

station, et cela maintenant gêne la conversation, c'est un signal parasite ou un bruit, selon la compréhension que j'ai de la production d'ondes sonores dans ce cas particulier. Le phénomène physique n'a pas changé, seul le point de vue de l'observateur, c'est-à-dire le sens, a varié.

## 8. ENSEIGNEMENT

Avec des enjeux à longue et à courte portée, la mesure révèle et tisse un réseau complexe de relations entre recherche de base, recherche technologique et pratique industrielle. Elle suscite, en tant que pratique et en tant que science des questions et des spéculations de première importance.

L'usage est, à ce stade, de conclure que cette activité, mal aimée des enseignements, mériterait un meilleur sort dans les programmes. Je ferai ici un pas de côté par rapport à cette tradition. Un enseignement spécifique de la mesure ne se conçoit pas sans une solide culture scientifique générale. Cet enseignement existe déjà, au niveau pertinent, par exemple DEA, ou encore thème d'étude national de Travaux d'Initiative Personnelle Encadrée des classes préparatoires aux grandes écoles. Pour le reste, la mesure imprègne le tissu éducatif en tout lieu et en toute situation : des classes d'éveil, où l'on cultive le qualitatif, aux classes secondaires, où l'on mesure et repère, en passant par l'enseignement élémentaire, où l'on s'initie aux relations d'ordre. Cet enseignement, délocalisé entre plusieurs disciplines conjugue des phases d'enseignement magistral et d'auto-apprentissage. Il appartient à l'enseignant de créer la situation favorable au questionnement critique. Mais, et c'est là que je voulais en venir, il n'appartient pas qu'à lui seul. L'utilisation du nombre, belle conquête de l'esprit humain, est souvent pervertie dans les médias par la cacophonie utilisant les mots - mais détournant le langage - de la science et serinant une pagaille de nombres décérébrés<sup>14</sup>. Devant ces agressions, la cellule scolaire et la cellule familiale doivent partager cette ambition incommensurable : amener à la critique et au doute, en un mot à l'autonomie et à la tolérance.

14. *Exemple triste* : dans une production vidéo à prétention pédagogique, l'homme (fauteuil, journal) explique à la femme (tablier de cuisine) qu'une horloge «digitale» est plus précise qu'une horloge à aiguilles, parce qu'*on y lit les indications exactement*.

*Exemple misérable* : l'absence persistante de l'intervalle de confiance dans les résultats publiés de plusieurs sondages. Les doctes arguties avancées pour justifier ce manque dissimulent mal le mépris du citoyen.