

Foreword / *Avant-propos*

The French Academy of Sciences and the systems of units: A long history!



20 May 2019: nothing will be as before in the realm of the units with which we measure everything! The 26th General Conference of Weights and Measures (CGPM), chaired by Sébastien Candel, president of the French Academy of Sciences, was held in Versailles in November 2018. The conference redefined four units of measurement, the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole, from four fundamental constants of physics: the Planck constant h of quantum mechanics, the elementary charge e , the Boltzmann constant k_B , and the Avogadro constant N_A . This brings an end to the use of material artefacts such as the international prototype of the kilogram, carefully preserved since 1889 at the “pavillon de Breteuil” housing the International Bureau of Weights and Measures in Sèvres, near Paris. The 59 Member States of the Metre Convention unanimously approved this major change, the most important since its creation in 1875. The kilogram, unit of mass, is now defined from the second, unit of time, and the metre, unit of distance, thanks to quantum physics, by fixing the numerical value of Planck’s constant h , the elementary action in quantum mechanics. But, in its 353-year history, which role has the “Académie” played in the creation and evolution of this system of units?

Since the creation of the “Académie des sciences” in 1666 by King Louis XIV, the royal administration has been interested in measurement systems within the kingdom, for lengths, weights, volumes, and materials. It has solicited many times the scholars of the Academy to help in its desire to simplify their use and facilitate trade. There was a lot of disorder in the units, including the elbow, the foot, the ell, the yardstick, and many others. The historian Ken Adler has estimated that there were more than 250,000 units in use at that time, which often differed from one city to another across the kingdom, and of course from one country to another. The units of length and weight were the most important, simply to measure the lengths of pieces of fabric, or to map the kingdom of France or exchange material quantities.

The French Revolution, with its ideals of equality and universality at the end of the 18th century, challenged academics to establish a system of units accessible “at all times and for all peoples”. Thus, a commission of the Academy where the illustrious Borda, Lagrange, Laplace, Monge, and Condorcet were sitting recommended in 1791 to define the metre as $1/10\,000\,000$ of the quarter of the terrestrial meridian. It was necessary for them to report all measures “to a unit of length taken in nature, [...] the only way to exclude any arbitrariness from the system of measurements”. It had to be a universal quantity and accessible to all. The National Assembly voted in 1791 a large budget for a major expedition to measure the length of a meridian fraction between Dunkerque and Barcelona, in view of a practical realisation of this definition of the metre. Two scientists, Jean-Baptiste Delambre and Pierre Méchain, were sent to the field in 1792 to carry out these measurements by triangulation, which lasted for more than seven years. A prototype of the metre by Lenoir and a kilogram of platinum became in December 1799 the final standards of length and mass throughout the French Republic. The decimal metric system then prevailed.

The next major step was the Metre Convention in 1875, with the creation of the International Bureau of Weights and Measures, one of the very first international bodies. The vision of its creators was to facilitate scientific and commercial developments between nations through a better international coordination on the unit system. The reader will find in the article by Suzanne Débarbat and Terry Quinn an exciting historical description of all these steps that led to the development of modern metrology and the recent redefinition of four basic units.

This volume continues with two contributions that place the new unit system within a broader context. Christian Bordé shows how matter–wave interferometry allows for a unified interpretation of basic units in the context of a five-dimensional geometry involving proper time. This geometry is determined by fixing three constants, the speed of light in vacuum c , the elementary electric charge e , and the mass difference Δm_{Cs} of a caesium atom between its fundamental level and the excited one serving in the definition of the second. The description of its physical content then requires adopting the Planck constant h and the Boltzmann constant k_B as the elementary quantities of action and entropy.

<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2019.05.017>

1631-0705/© 2019 Published by Elsevier Masson SAS on behalf of Académie des sciences. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Next Pierre Fayet shows that we can go even further in the process fixing the numerical values of certain fundamental constants. He proposes to choose, *at the same time*, $c = \hbar = 1$ where $\hbar = h/2\pi$. He shows that this new system includes and transcends the one retained by the 26th CGPM, while allowing one to identify the fundamental units from the second, or its inverse. The electric charge unit, the coulomb, becomes a pure dimensionless number, as does the elementary charge e , equal both to $1.602... \times 10^{-19}$ coulomb and to $\sqrt{4\pi\alpha}$, where α is the fine structure constant of the electromagnetic interaction, close to 1/137. The electrical resistance unit, the ohm, is also dimensionless, the vacuum impedance, while still equal to about 377Ω , being now also equal to 1.

The remainder of this volume describes the state of the art concerning the four measurement units that have just been redefined. Fixing a numerical value for the Planck constant h makes it possible to realise the unit of mass, the kilogram, using the Watt balance, renamed Kibble balance, through a virtual electric power, as explained by Stephan Schlamminger and Darine Haddad. Such scales can now operate with various masses to meet industrial needs, including those of personalised medicine or weighing precious materials.

An alternative approach for realising the kilogram is the so-called silicon sphere method, in which the silicon-28 atoms are counted in a crystal having the shape of a sphere, as perfect as possible. Horst Bettin and his colleagues describe a method of X-ray interferometric crystallography that makes it possible to measure with great precision the mesh of a silicon-28 crystal, involved in the calculation of the number of atoms. To redefine the kilogram by fixing the value of the Planck constant, it was necessary to ensure beforehand that the Kibble-balance and silicon-sphere methods gave the same value for h . This was verified at the 3×10^{-8} precision level by several independent sensitive experiments, analysed by the BIPM group responsible for metrological data, the Codata. These methods also allow, conversely, to set the definition of the mole or the value of the Avogadro number, widely used in chemistry. The relative atomic mass of a carbon 12 atom is then no longer exactly equal to 12, but only with an uncertainty of a few 10^{-8} .

As Pierre Cladé and his co-authors show, once the value of the Planck constant has been set, matter-wave interferometry becomes a method of choice for measuring atomic masses at a precision level of the order of 10^{-10} . The fine structure constant α , which is the coupling constant of the electromagnetic interaction, can be measured with great precision and the comparison with the measurement of the electron anomalous magnetic moment provides a very precise test of quantum electrodynamics.

Quantum physics also plays a central role in the realisation of the electrical units, most notably the ampere and the volt, through the Josephson and quantum Hall effects, as described by Wilfrid Poirier and his collaborators. Following the discovery of the quantum Hall effect by Klaus von Klitzing, the electrical units, becoming more precisely realised than through the traditional SI definitions, were de facto coming out of the International System of units. By setting the values of h and of the elementary charge e , the volt and ampere can be brought back within the new SI, making it possible to recover a coherent and global unit system.

The Boltzmann constant k_B provides the link between temperature and energy, and is used to characterise the entropy of a system in thermodynamic equilibrium. Its numerical value was also set during the last session of the CGPM, as made possible thanks to a set of measurements of remarkable precision, at the level of 10^{-6} , reported by Laurent Pitre and his co-authors. The temperature scale can now be achieved through a variety of methods over a much wider range of temperatures.

For millennia, astronomy has used measurement units adapted to the great distances and masses observed in the universe. François Mignard explains the methods used for these determinations, both in the solar system and in extragalactic systems. He also shows the exceptional contribution of the space missions *Hipparcos* and *Gaia*, which provided the relative trigonometric coordinates of billions of stars with a very high precision.

Finally, one of the units whose definition remained unchanged at the 26th CGPM in November 2018 is the unit of proper time, the second. This one plays a central role as it can be realised with a spectacular relative accuracy of 10^{-16} , the precise measurements of many other physical quantities being very often expressed in frequency, Hz or s^{-1} . Sébastien Bize gives an account of modern cold atom clocks, remote clock comparison methods and time scales. The advent of clocks operating in the optical domain of the electromagnetic spectrum, rather than in the microwave domain, makes it possible to gain at least two orders of magnitude in precision, to reach the 10^{-18} level. The knowledge of the gravitational potential felt by the clock must then be excellent. A frequency shift of 10^{-18} corresponds indeed, for a terrestrial clock, by Einstein's redshift formula, to an altitude difference of one centimetre only! And one can thus predict that one of the next General Conferences of Weights and Measures will have to make the definition of the second evolve... Thus, modern metrology has today become fully quantum and relativistic, in accordance with the current description of the world around us.

We could not finish this short introduction without paying tribute to our colleague Jean Kovalevsky (Fig. 1), who unfortunately left us on 17 August 2018, just a few months before the 26th CGPM. A pioneer in the study of the motion of natural or artificial satellites, the ultra-precise measurement of the Earth-Moon distance by laser ranging, and one of the fathers of the *Hipparcos* satellite, Jean also brilliantly animated the national and international metrology community. President of the National Bureau of Metrology (precursor of the "Laboratoire national d'essais"), he has also chaired the International Committee of Weights and Measures from 1997 to 2004. Jean co-chaired with Christian Bordé the Science and Metrology Committee of the "Académie des sciences", where many ideas about the new unit system were debated. The international metrology community owes a lot to Jean Kovalevsky today.



Fig. 1. Jean Kovalevsky next to the international prototype of the kilogram in the “Bureau international des poids et mesures” at Sèvres, France.

Fig. 1. Jean Kovalevsky devant le kilogramme étalon du Bureau international des poids et mesures à Sèvres.

L'Académie des sciences et les systèmes d'unités de mesure : une longue histoire !

20 mai 2019 : rien ne sera plus comme avant au royaume des unités avec lesquelles nous mesurons toute chose ! La 26^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM), présidée par Sébastien Candel, président en exercice de l'Académie des sciences, s'est tenue à Versailles en novembre 2018. Elle a redéfini quatre unités de mesure, le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole, à partir de quatre constantes fondamentales de la physique : la constante de Planck h de la mécanique quantique, la charge élémentaire e , la constante de Boltzmann k_B et celle d'Avogadro N_A . C'en est fini de l'utilisation d'artefacts matériels comme le kilogramme étalon, conservé précautionneusement depuis 1889 au pavillon de Breteuil du Bureau international des poids et mesures à Sèvres, près de Paris. Les 59 États membres de la convention du mètre ont approuvé à l'unanimité ce changement majeur, le plus important depuis la création de cette convention en 1875. Le kilogramme, unité de masse, est désormais défini à partir de la seconde, unité de temps, et du mètre, unité de distance, grâce à la physique quantique, en fixant la valeur de la constante de Planck h , l'action élémentaire en mécanique quantique. Mais, durant ses 353 ans d'histoire, quel rôle a joué l'Académie dans la création et les évolutions de ce système d'unités ?

Dès la création de l'Académie des sciences en 1666 par le roi Louis XIV, l'administration royale s'était intéressée aux systèmes de mesure au sein du royaume, longueur, poids, volumes et matières. Elle sollicita à de nombreuses reprises les savants de l'Académie pour l'aider dans sa volonté de simplifier leur usage et faciliter ainsi les échanges commerciaux. Il régnait alors un grand désordre dans les unités, incluant le coude, le pied, l'aune, la toise, et bien d'autres encore. L'historien Ken Adler a ainsi estimé qu'il y avait plus de 250 000 unités en usage à cette époque, qui différaient souvent d'une ville à l'autre à travers le royaume, et bien sûr d'un pays à l'autre. Les unités de longueur et de poids étaient les plus importantes, pour simplement mesurer la longueur des pièces de tissus ou cartographier le royaume de France, ou pour échanger des quantités de matière.

À la fin du XVIII^e siècle, la Révolution française, avec ses idéaux d'égalité et d'universalité, interpella les savants de l'Académie pour établir un système d'unités accessible « à tous les temps et à tous les peuples ». C'est ainsi qu'une commission de l'Académie où siégeaient les illustres Borda, Lagrange, Laplace, Monge et Condorcet préconisa en 1791 de définir le mètre comme la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. Il fallait à leurs yeux rapporter toutes les mesures « à une unité de longueur prise dans la nature, [...] le seul moyen d'exclure tout arbitraire du système des mesures ». Ce devait être une quantité universelle et accessible à tous. L'Assemblée nationale vota en 1791 un important budget pour une expédition d'envergure ayant pour but de mesurer la longueur d'une fraction de méridien entre Dunkerque et Barcelone, permettant ainsi la réalisation pratique de cette définition du mètre. Deux scientifiques, Jean-Baptiste Delambre et Pierre Méchain,

furent envoyés en 1792 en mission sur le terrain pour effectuer ces mesures par triangulation, mesures qui s'étendirent sur plus de sept années. Un prototype du mètre réalisé par Lenoir et un kilogramme de platine devinrent en décembre 1799 les étalons définitifs de longueur et de masse dans toute la république. Le système métrique décimal s'imposa alors.

L'étape essentielle suivante fut la Convention du Mètre en 1875, avec la création du Bureau international des poids et mesures, l'un des tous premiers organismes internationaux. La vision de ses créateurs était de faciliter les développements scientifiques et commerciaux entre nations par une meilleure coordination internationale sur le système d'unités. Le lecteur trouvera dans l'article de Suzanne Débarbat et Terry Quinn une description historique passionnante de toutes ces étapes, qui ont conduit au développement de la métrologie moderne et à cette dernière redéfinition de quatre unités de mesure.

Ce volume se poursuit avec deux contributions qui placent le nouveau système d'unités dans un contexte plus large. Christian Bordé montre comment l'interférométrie à ondes de matière permet une interprétation unifiée des unités de base dans le cadre d'une géométrie à cinq dimensions faisant intervenir le temps propre. Cette géométrie est déterminée en fixant trois constantes, la vitesse de la lumière dans le vide c , la charge électrique élémentaire e , et la différence de masse Δm_{Cs} d'un atome de césium entre son niveau fondamental et le niveau excité qui sert dans la définition de la seconde. La description de son contenu physique requiert ensuite d'adopter la constante de Planck h et la constante de Boltzmann k_{B} comme quantités élémentaires d'action et d'entropie.

Pierre Fayet montre que l'on peut aller encore plus loin dans la démarche qui fixe les valeurs numériques de certaines constantes fondamentales. Il propose de choisir, *en même temps*, $c = \hbar = 1$ où $\hbar = h/2\pi$. Il montre que ce nouveau système inclut et transcende celui retenu par la 26^e CGPM, tout en permettant d'identifier les unités fondamentales à partir de la seconde, ou de son inverse. L'unité de charge électrique, le coulomb, devient un nombre pur, sans dimension, de même que la charge élémentaire e , égale à la fois à $1,602 \dots \times 10^{-19}$ coulomb et à $\sqrt{4\pi\alpha}$, où α est la constante de structure fine de l'interaction électromagnétique, voisine de $1/137$. L'unité de résistance électrique, l'ohm, est également sans dimension, l'impédance du vide, tout en restant égale à 377Ω environ, étant maintenant aussi égale à 1.

La suite de ce volume est consacrée à une description de l'état de l'art concernant les quatre unités de mesure qui viennent d'être redéfinies. Donner une valeur numérique fixée à la constante de Planck h permet de réaliser l'unité de masse, le kilogramme, à l'aide de la balance du Watt, désormais nommée balance de Kibble, faisant intervenir une puissance électrique virtuelle, comme l'expliquent Stephan Schlamminger et Darine Haddad. De telles balances peuvent désormais opérer avec des masses plus petites, pour répondre à des besoins industriels comme ceux de la médecine personnalisée ou la pesée de matériaux précieux.

Une approche alternative pour la réalisation du kilogramme est la méthode dite de la sphère de silicium, où l'on dénombre les atomes de silicium 28 dans un cristal ayant la forme d'une sphère, la plus parfaite possible. Horst Bettin et ses collègues décrivent une méthode de cristallographie interférométrique par rayons X qui permet de mesurer avec une grande précision la maille d'un cristal de silicium 28, intervenant dans le calcul du nombre d'atomes. Pour redéfinir le kilogramme en fixant la valeur de la constante de Planck, il a fallu s'assurer auparavant que la méthode de la balance de Kibble et celle de la sphère de silicium donnaient bien la même valeur pour h . Ceci a été vérifié au niveau de précision de 3×10^{-8} par plusieurs expériences délicates indépendantes, analysées par le groupe du BIPM responsable des données métrologiques, le Codata. Ces méthodes permettent aussi, inversement, de fixer la définition de la mole ou la valeur du nombre d'Avogadro, très utilisés en chimie. La masse atomique relative d'un atome de carbone 12 n'est alors plus exactement égale à 12, mais seulement avec une incertitude de quelques 10^{-8} .

Comme le montrent ensuite Pierre Cladé et ses co-auteurs, une fois fixée la valeur de la constante de Planck, l'interférométrie à ondes de matière devient une méthode de choix pour mesurer les masses atomiques à un niveau de précision de l'ordre de 10^{-10} . La constante de structure fine α , qui est la constante de couplage de l'interaction électromagnétique, peut être mesurée avec une grande précision et la comparaison avec la mesure du moment magnétique anormal de l'électron fournit un test très précis de l'électrodynamique quantique.

La physique quantique intervient également de façon centrale dans la réalisation des unités électriques, notamment l'ampère et le volt, à travers l'effet Josephson et l'effet Hall quantique, comme le décrivent Wilfrid Poirier et ses collaborateurs. À la suite de la découverte de l'effet Hall quantique par Klaus von Klitzing, les unités électriques, alors réalisées plus précisément que par les définitions traditionnelles du SI, étaient sorties *de facto* du Système international d'unités. En fixant désormais les valeurs de h et de la charge élémentaire e , on peut faire revenir le volt et l'ampère au sein du nouveau SI, ce qui permet de disposer à nouveau d'un système d'unités global et cohérent.

La constante de Boltzmann k_{B} fait le lien entre température et énergie, et est utilisée pour caractériser l'entropie d'un système à l'équilibre thermodynamique. Sa valeur numérique a également été fixée lors de la dernière session de la CGPM, ce qui a été rendu possible grâce à un ensemble de mesures de précision remarquables, au niveau de 10^{-6} , que nous relatent Laurent Pitre et ses co-auteurs. L'échelle des températures peut désormais être réalisée par diverses méthodes et sur une gamme de températures beaucoup plus étendue.

Depuis des millénaires, l'astronomie utilise des unités de mesure adaptées aux grandes distances et aux grandes masses observées dans l'univers. François Mignard nous expose les méthodes utilisées pour ces déterminations, dans le système solaire comme dans les systèmes extragalactiques. Il montre également l'apport exceptionnel des missions spatiales *Hipparcos* et *Gaia*, qui ont fourni les coordonnées trigonométriques relatives de milliards d'étoiles avec une très grande précision.

Finalement, l'une des unités dont la définition est restée inchangée lors de la 26^e CGPM de novembre 2018 est l'unité de temps propre, la seconde. Celle-ci joue un rôle central, car elle peut être réalisée avec une précision spectaculaire, de 10^{-16} en valeur relative, la mesure précise de nombreuses autres quantités physiques étant très souvent exprimée en fré-

quence, Hz ou s^{-1} . Sébastien Bize fait le point sur les horloges modernes à atomes froids, les méthodes de comparaison d'horloges distantes et les échelles de temps. L'avènement des horloges fonctionnant dans le domaine optique du spectre électromagnétique, plutôt que dans le domaine des micro-ondes, permet de gagner encore au moins deux ordres de grandeur en précision, pour parvenir au niveau de 10^{-18} . La connaissance du potentiel gravitationnel ressenti par l'horloge doit alors être excellente. Un décalage de fréquence de 10^{-18} correspond en effet pour une horloge terrestre, par la formule d'Einstein du décalage vers le rouge, à une différence d'altitude de 1 cm seulement ! Et l'on peut ainsi prévoir que l'une des prochaines Conférences générales des poids et mesures aura à faire évoluer la définition de la seconde... Ainsi la métrologie moderne est aujourd'hui devenue totalement quantique et relativiste, en accord avec la description actuelle du monde qui nous entoure.

Nous ne saurions terminer cette courte introduction sans rendre hommage à notre confrère Jean Kovalevsky, qui nous a malheureusement quittés le 17 août 2018, quelques mois seulement avant la 26^e CGPM. Pionnier de l'étude du mouvement des satellites naturels ou artificiels, de la mesure ultraprécise de la distance Terre-Lune par impulsions laser, et l'un des pères du satellite *Hipparcos*, Jean a également animé brillamment la communauté nationale et internationale de métrologie. Président du Bureau national de métrologie (précurseur du Laboratoire national d'essais), il a aussi présidé le Comité international des poids et mesures de 1997 à 2004. Jean a coprésidé avec Christian Bordé le comité Science et Métrologie de l'Académie des sciences, où de nombreuses idées concernant le nouveau système d'unités ont été débattues. La métrologie internationale doit aujourd'hui beaucoup à Jean Kovalevsky.

Christophe Salomon
*Laboratoire Kastler-Brossel,
Département de physique,
École normale supérieure,
24, rue Lhomond,
75231 Paris cedex 05, France*
E-mail address: salomon@lkb.ens.fr

Christian Bordé
*SYRTE, Observatoire de Paris,
61, avenue de l'Observatoire,
75014 Paris, France*

Pierre Fayet
*Laboratoire de physique
de l'École normale supérieure,
24, rue Lhomond,
75231 Paris cedex 05, France*