

Une introduction au nouveau Système international d'unités

par **Christophe DAUSSY** et **Fabrice WIOTTE**

Université Paris 13 - Sorbonne Paris Cité - CNRS - UMR 7538

Laboratoire de physique des lasers (LPL) - 93430 Villetaneuse

christophe.daussy@univ-paris13.fr

fabrice.wiotte@univ-paris13.fr

***E**N DÉCIDANT DE FIXER CERTAINES CONSTANTES universelles, les métrologues s'apprêtent à changer notre façon de mesurer le monde. Cette évolution historique sera marquée par une réforme majeure du Système international d'unités (SI) dont l'ambition est d'établir un système de mesure plus cohérent, plus stable et universel. Nous présentons les grands enjeux de cette réforme avant d'expliquer les étapes de la construction du nouveau système qui entrera en vigueur en mai 2019.*

INTRODUCTION

Notre Système international d'unité (SI) a connu au mois de novembre 2018 une évolution majeure qui marquera son histoire. À l'occasion d'une grande conférence internationale, la 26^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) qui s'est déroulée du 13 au 16 novembre 2018 à Versailles, il a été décidé de changer la définition du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole. Ces quatre unités ont été redéfinies à partir de quatre constantes fondamentales de la physique :

- ◆ la constante de Planck (h) ;
- ◆ la charge élémentaire (e) ;
- ◆ la constante de Boltzmann (k) ;
- ◆ et la constante d'Avogadro (N_A).

Les définitions des trois autres unités de base, la seconde, le mètre et la candela seront quant à elles reformulées de façon à établir un nouveau système d'unités défini par sept constantes universelles fixées à des valeurs exactes. Cette évolution historique verra l'instauration du système d'unités le plus invariable et universel jamais établi par l'homme.

Après avoir rappelé les bases de l'ancien système d'unités (en vigueur jusqu'au mois de mai 2019), nous présentons les principales raisons qui ont motivé la redéfinition du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole à partir des valeurs numériques de quatre constantes fondamentales. Nous justifierons le choix des constantes

h , e , k et N_A pour ensuite expliquer la construction du système. La détermination expérimentale de k dans le cadre du Projet Boltzmann, ainsi que différentes mises en pratique simples du nouveau kelvin, réalisées avec des étudiants de premier cycle, seront discutées en annexe à titre d'exemples.

1. LES BASES DE LA RÉFORME DE NOTRE SYSTÈME DE MESURE

Les définitions des unités ne sont pas figées. Au cours des siècles, elles ont été adaptées afin de répondre à l'évolution des besoins de l'industrie, du commerce, mais également aux progrès de la science et de la technologie. Depuis plus de deux siècles, l'évolution de nos unités de mesure est guidée par la volonté de tendre vers un système de plus en plus stable et universel. Cette histoire est marquée par la naissance en 1960 du Système international d'unités à l'occasion de la 11^e Conférence générale des poids et mesures. Le Système international d'unités comportait alors six unités de base (associées à six grandeurs de base) : le mètre (pour la longueur), le kilogramme (pour la masse), la seconde (pour le temps), l'ampère (pour le courant électrique), le kelvin (pour la température thermodynamique) et la candela (pour l'intensité lumineuse). La mole fut ajoutée en 1971 pour exprimer la quantité de matière, portant à sept le nombre d'unités de base [1].

Les définitions des unités reposent actuellement pour l'ampère et la candela sur des expériences idéales, pour la seconde, le kelvin et la mole sur des systèmes physiques particuliers (l'atome de césium, le point triple de l'eau et l'atome de carbone 12), pour le mètre sur une constante fondamentale (la vitesse de la lumière dans le vide) et enfin sur un objet matériel particulier (le prototype international du kilogramme) pour l'unité de masse (cf. tableau 1, page ci-contre).

Ces définitions forment un ensemble disparate qui doit être réformé afin d'établir un système plus cohérent, invariable et universel. Dans le nouveau système d'unités, aux trois grandeurs $\Delta\nu_{Cs}$, c et K_{cd} (fixées pour définir la seconde, le mètre et la candela), viendront s'ajouter h , e , k et N_A pour redéfinir le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole [1-3].

2. POURQUOI REDÉFINIR LE KILOGRAMME, L'AMPÈRE, LE KELVIN ET LA MOLE ?

La mise en place du nouveau Système international d'unités permettra de surmonter plusieurs difficultés intrinsèquement liées aux définitions des unités de masse, de courant électrique, de température et de quantité de matière de l'ancien système.

Le kilogramme repose depuis 1889 sur un objet matériel particulier, le prototype international du kilogramme (noté \mathcal{K}). Cette définition qui privilégie une masse particulière ($\mathcal{K} = 1$ kg) conduit à une qualité des pesées dégradée pour les masses

Définition	Grandeur fixée
La seconde est définie par la fréquence de transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, qui vaut 9 192 631 770 Hz.	Fréquence de transition ^{133}Cs : $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$
Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.	Vitesse de la lumière : $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$
Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.	Prototype international du kilogramme : $m(\mathcal{K}) = 1 \text{ kg}$
L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance d'un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.	Perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.	Température du point triple de l'eau : $T_{\text{TPW}} = 273,16 \text{ K}$
La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12.	Masse molaire du ^{12}C : $M(^{12}\text{C}) = 0,012 \text{ kg mol}^{-1}$
La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.	Constante K_{cd} : $K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm/W}$

Tableau 1 - Définitions des sept unités de base dans l'ancien Système international d'unités et valeurs des grandeurs physiques associées.

inférieures au kilogramme. Les pesées à l'échelle du milligramme sont ainsi deux mille cinq cents fois moins précises que celles réalisées autour d'un kilogramme [3]. Un autre problème bien connu concerne la stabilité – ou plutôt l'instabilité – à long terme du kilogramme. On sait en effet que les masses des différents étalons (\mathcal{K} et ses copies) sont instables et ont varié les unes par rapport aux autres d'environ 50 μg en un siècle [4] ! Dans ces conditions, que dire par exemple de la stabilité de la masse de l'électron ou du proton sur la même période ?

La définition de la mole qui exprime la quantité de matière contenue dans 0,012 kg de carbone 12 repose sur la définition du kilogramme. Elle est donc directement impactée par les problèmes liés à l'unité de masse et la quantité de matière contenue aujourd'hui dans une mole n'est pas strictement la même qu'en 1971 lorsqu'elle a été introduite dans le Système international d'unités !

En reposant sur des invariants de la nature, la nouvelle définition du kilogramme assurera la stabilité de l'unité tout en ne privilégiant aucune masse particulière.

Un autre problème majeur actuel est posé par l'expérience idéale qui depuis 1948 sert à définir l'ampère : la force mécanique entre deux fils infiniment longs, séparés d'un mètre, dans lesquels circule un courant. Depuis plusieurs décennies, les mesures électriques n'utilisent plus cette définition qui a en pratique été remplacée par des étalons bien plus performants : un étalon de tension et un étalon de résistance qui reposent respectivement sur un effet quantique dans un semi-conducteur (l'effet Hall quantique) et sur un effet qui apparaît à basse température dans un supraconducteur (l'effet Josephson) [5-6]. Ces étalons font intervenir e et h , deux constantes qui seront fixées dans le nouveau Système international d'unités. La nouvelle définition de l'ampère permettra donc de réconcilier définition et réalisations pratiques des unités électriques.

Pour finir l'unité de température, le kelvin. Elle repose depuis 1954 sur un système physique particulier, le point triple de l'eau (en anglais TPW), défini comme point fixe fondamental auquel est attribuée la température exacte de 273,16 K. Problème, la température de cet état particulier dépend de la composition isotopique de l'eau utilisée. Il est donc nécessaire de définir très précisément les rapports des différents isotopes qui permettent, par convention, de réaliser un TPW à 273,16 K⁽¹⁾. Le kelvin repose ainsi sur un invariant donné par la nature (la température du point triple) réalisé pour une espèce particulière (l'eau) et une composition isotopique bien spécifique. En pratique toute mesure doit se référer à cette température particulière, contrainte qui pose de grandes difficultés notamment pour les thermomètres fonctionnant à très basses ou à très hautes températures (respectivement au-dessous de 20 K et au-dessus de 1300 K). Fixer k plutôt que T_{TPW} à 273,16 K permettra de ne privilégier aucune température et de lever cette difficulté.

3. LA CONSTRUCTION DU SYSTÈME D'UNITÉS À PARTIR DE CONSTANTES UNIVERSELLES

La mise en place d'un système d'unités reposant intégralement sur des constantes fondamentales de la physique est un rêve de longue date pour les physiciens. En 1906, Max Planck présente un système dans lequel les valeurs numériques des constantes c ,

(1) En 2005, le Comité international des poids et mesures (CIPM) a clarifié la situation en indiquant que la composition isotopique de l'eau pour la réalisation de la définition du kelvin correspond à celle dite de l'eau océanique moyenne normalisée de Vienne ou VSMOW (de l'anglais Vienna Standard Mean Ocean Water). Cette VSMOW a été définie en 1968 par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et est censée représenter la composition isotopique moyenne de l'eau terrestre. Elle contient exactement 0,000 155 76 mole de ^2H par mole de ^1H , 0,000 379 9 mole de ^{17}O par mole de ^{16}O et 0,002 005 2 mole de ^{18}O par mole de ^{16}O [1].

h , G et k sont fixées à 1. En combinant ces quatre constantes, il définit un temps, une longueur, une masse et une température, le système de Planck [7]. Pourtant ce système présente un défaut rédhibitoire, des ordres de grandeur pour les unités de temps, de longueur et de température totalement inadaptés aux applications métrologiques. Sans compter l'incertitude relative sur la constante de gravitation G , encore bien trop grande aujourd'hui pour pouvoir fixer sa valeur sans fortement dégrader la précision des mesures dans un nouveau système d'unités [8]. Plus d'un siècle plus tard, après de nombreux débats sur le jeu le plus pertinent de constantes, les conditions pour établir un tel système d'unités sont enfin réunies. L'évolution des connaissances ainsi que les progrès instrumentaux et la cohérence récente des résultats obtenus dans les différents groupes de recherche sur la détermination des constantes fondamentales ont ainsi conduit en 2017 le Comité international des poids et mesures (CIPM) à recommander la redéfinition du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole à partir des constantes h , e , k et N_A [1] (voir l'exemple de la mesure de la constante de Boltzmann en annexe 1)⁽²⁾. Ces quatre constantes ont été retenues pour les raisons suivantes :

- ◆ Chacune s'exprime en fonction de l'unité que l'on cherche à définir et éventuellement d'autres unités de base elles-mêmes définies par d'autres constantes.
- ◆ Ce sont des invariants de la nature (indépendants du temps et de l'espace) à caractère universel ce qui permettra d'assurer la stabilité à long terme des nouvelles définitions.
- ◆ Elles ont été mesurées avec une très faible incertitude dans l'ancien Système international d'unités ce qui permettra de fixer la valeur numérique de chaque constante en garantissant la continuité entre l'ancien et le nouveau système de mesure.

Comme toute grandeur physique, une constante s'exprime sous la forme du produit d'un nombre sans dimension (noté ici entre accolades) et d'une unité (notée ici entre crochets) :

$$Q_{\text{const}} = \{Q_{\text{const}}\} \times [Q_{\text{const}}].$$

Q_{const} est donnée par la nature et est indépendante du temps et de l'espace, on dit qu'elle est invariante. En fixant $\{Q_{\text{const}}\}$ à une valeur numérique exacte, l'unité associée $[Q_{\text{const}}]$ se trouve définie.

$\{\Delta v_{\text{Cs}}\}$, $\{K_{\text{cd}}\}$ et $\{c\}$ ont été fixées à une valeur exacte par les définitions res-

(2) Il est à noter que l'on rencontre dans les théories scientifiques des grandeurs, parfois des constantes, sans dimension et sans unité. Ces paramètres – ou nombres adimensionnels – expriment le produit ou le rapport de grandeurs dimensionnées qui conduisent à un nombre sans unité dans le Système international d'unités. Les valeurs numériques de ces nombres sont totalement indépendantes du choix du système d'unités et ne peuvent en aucun cas servir de base à une définition des unités. En revanche ces constantes sans dimension sont celles sur lesquelles reposent les expériences dites de recherche d'une possible variation des constantes fondamentales [9].

pectivement de la seconde (en 1967), de la candela (en 1979) et du mètre (en 1983). Les valeurs numériques de $\{h\}$, $\{e\}$, $\{k\}$ et $\{N_A\}$ ainsi que leurs incertitudes ont été déterminées dans l'ancien Système international d'unités par le CODATA Task Group on Fundamental Constants à partir de l'ensemble des résultats expérimentaux et théoriques publiés dans la littérature scientifique au 1^{er} juillet 2017 [10-11]. La valeur numérique de chacune de ces constantes a enfin été fixée définitivement à une valeur exacte en novembre 2018 lors de la 26^e Conférence générale des poids et mesures.

Le nouveau Système international d'unités qui entrera en vigueur en mai 2019 sera le système d'unités dans lequel [12] :

- ◆ la fréquence de transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, vaut 9 192 631 770 Hz ;
- ◆ la vitesse de la lumière dans le vide, c , vaut 299 792 458 m/s ;
- ◆ la constante de Planck, h , vaut $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s ;
- ◆ la charge élémentaire, e , vaut $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C ;
- ◆ la constante de Boltzmann, k , vaut $1,380\,649 \times 10^{-23}$ J/K ;
- ◆ la constante d'Avogadro, N_A , vaut $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹ ;
- ◆ l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{cd} , vaut 683 lm/W .

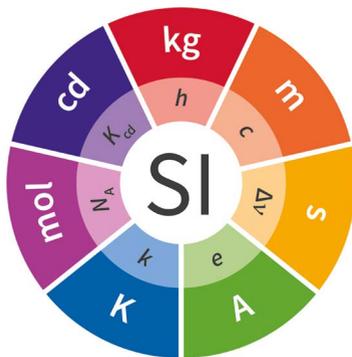


Figure 1 - Logo du nouveau Système international d'unités (source BIPM).

Le nouveau Système international d'unités donne les valeurs numériques exactes de sept constantes universelles dimensionnées, définissant ainsi les unités de fréquence, de vitesse, d'action, de charge électrique, d'entropie, d'efficacité lumineuse et l'inverse de l'unité de quantité de matière. En combinant ces constantes, toutes les autres unités peuvent être construites (sans distinction explicite entre unités de base et unités dérivées dans ce nouveau système). Le tableau 2 (cf. page ci-contre) présente les nouvelles définitions des unités de temps, de longueur, de masse, de courant électrique, de température, de quantité de matière et d'intensité lumineuse.

Unité	Définition	
seconde (s)	La définition de la seconde repose sur la valeur numérique de $\Delta\nu_{Cs}$:	$1 \text{ s} = \frac{\{\Delta\nu_{Cs}\}}{\Delta\nu_{Cs}}$ 
mètre (m)	La définition du mètre repose sur les valeurs numériques de deux constantes $\Delta\nu_{Cs}$ et c :	$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{\{c\}}\right) \text{ s} = \left(\frac{\{\Delta\nu_{Cs}\}}{\{c\}}\right) \frac{c}{\Delta\nu_{Cs}}$ 
kilo-gramme (kg)	La définition du kilogramme repose sur les valeurs numériques de trois constantes $\Delta\nu_{Cs}$, c et h :	$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{\{h\}}\right) \text{ m}^{-2} \text{ s} = \left(\frac{\{c\}^2}{\{h\}\{\Delta\nu_{Cs}\}}\right) \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{c^2}$ 
ampère (A)	La définition de l'ampère repose sur les valeurs numériques de deux constantes $\Delta\nu_{Cs}$ et e :	$1 \text{ A} = \left(\frac{e}{\{e\}}\right) \text{ s}^{-1} = \left(\frac{1}{\{\Delta\nu_{Cs}\}\{e\}}\right) \Delta\nu_{Cs} e$ 
kelvin (K)	La définition du kelvin repose sur les valeurs numériques de trois constantes $\Delta\nu_{Cs}$, h et k :	$1 \text{ K} = \left(\frac{k}{\{k\}}\right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} = \left(\frac{\{k\}}{\{h\}\{\Delta\nu_{Cs}\}}\right) \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{k}$ 
mole (mol)	La définition de la mole repose sur la valeur numérique de N_A :	$1 \text{ mol} = \frac{\{N_A\}}{N_A}$ 
candela (cd)	La définition de la candela repose sur les valeurs numériques de trois constantes $\Delta\nu_{Cs}$, h et K_{cd} :	$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{cd}}{\{K_{cd}\}}\right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} = \left(\frac{1}{\{K_{cd}\}\{h\}\{\Delta\nu_{Cs}\}^2}\right) (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$ 

Tableau 2 - Définitions de la seconde, du mètre, du kilogramme, de l'ampère, du kelvin, de la mole et de la candela à partir des sept constantes du nouveau système d'unités⁽³⁾.

(3) Les unités hertz, joule, coulomb, lumen et watt sont reliées aux unités seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela selon les relations $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ et $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$.

Définir un système d'unités à partir de constantes physiques est un moyen très élégant pour déconnecter totalement définitions et réalisations pratiques des unités. Le nouveau système donne les valeurs numériques exactes d'un jeu de constantes, mais n'impose aucune approche expérimentale ou objet matériel particulier pour la réalisation de ces unités (cf. quelques exemples simples de mises en pratique du kelvin en annexe 2). Le grand intérêt de cette approche est qu'elle ouvre à l'avenir la possibilité de mettre à profit les progrès de la science et de la technologie pour développer des étalons toujours plus performants sans qu'il soit nécessaire de faire évoluer les définitions du système de mesure.

CONCLUSION

Plus de deux siècles après la première définition du mètre à partir d'un invariant de la nature (une fraction du quart du méridien terrestre), jusqu'à sa redéfinition en 1983 en fixant la valeur numérique de la vitesse de la lumière, nous sommes aujourd'hui en mesure d'étendre cette approche à l'ensemble des unités pour instaurer le premier système entièrement défini à partir de constantes universelles. Cette évolution historique verra l'entrée en vigueur le 20 mai 2019 du système de mesure le plus invariable et le plus universel jamais établi par l'homme.

Le nouveau Système international d'unités basé sur des constantes universelles remplit de façon ultime les objectifs de stabilité, d'universalité et d'accessibilité. La stabilité repose sur l'invariance supposée des constantes tandis que son universalité et son accessibilité sont illustrées par la possibilité de transmettre ce système d'unités en tout lieu, sur Terre et même au-delà. Le défi à relever pour les enseignants et les chercheurs est maintenant de faire connaître et d'expliquer aux enseignants, aux élèves et au grand public ce nouveau système sur lequel reposeront à l'avenir toutes nos mesures [13-15].

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Charlotte Chavanon et Anita Mouttou qui ont participé avec une grande rigueur et beaucoup d'efficacité aux mesures et analyses des expériences de thermométrie acoustique, électrique et laser présentées en annexe 2.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bureau international des poids et mesures (BIPM), documents disponibles en ligne : <https://www.bipm.org>
- [2] D. B. Newell, "A more fundamental International System of Units", *Physics Today*, vol. 67, n° 7, p. 35, July 2014.

- [3] E. Gibney, “New definitions of scientific units are on the horizon”, *Nature*, vol. 550, p. 312–313, October 2017.
- [4] G. Girard, “The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988–1992)”, *Metrologia*, vol. 31, n° 4p. 317, 1994.
- [5] B. Jeckelmann and B. Jeanneret, “The quantum Hall effect as an electrical resistance standard”, *Rep. Prog. Phys.*, vol. 64, n° 12, p. 1603–1655, November 2001.
- [6] C. A. Hamilton, C. J. Burroughs and S. P. Benz, “Josephson voltage standard – A review”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 7, n° 2, p. 3756–3761, June 1997.
- [7] M. Planck, *The Theory of Heat Radiation*, trans. M. Masius, Philadelphia : P. Blakiston’s Son & Co, 1914, consultable en ligne : <http://gutenberg.org/ebooks/40030>
- [8] Q. Li et al., “Measurements of the gravitational constant using two independent methods”, *Nature*, vol. 560, p. 582–588, August 2018.
- [9] J.-Ph. Uzan, “The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status”, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 75, p. 403, April 2003.
- [10] CODATA Task Group on Fundamental Constants, consultable en ligne : <http://www.codata.org/>
- [11] D. B. Newell and al., “The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI”, *Metrologia*, vol. 55, n° L13, January 2018, consultable en ligne : <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/aa950a/pdf>
- [12] Bureau international des poids et mesures, “Draft of the ninth SI Brochure”, February 2018, consultable en ligne : <https://www.bipm.org/utls/en/pdf/si-revised-brochure/Draft-SI-Brochure-2018.pdf>
- [13] M. Jamon et J. Bobroff, « Comment fabriquer les unités du SI », *La Physique autrement*, 2018, consultable en ligne : http://hebergement.u-psud.fr/supraconductivite/projet/unitas_mode_demploi/
- [14] C. Daussy, « Enjeux et perspectives de la refonte annoncée du Système international d’unités », *conférence ENS Lyon*, mars 2018, consultable en ligne : <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Nouveau-Systeme-International-Unites.xml>
- [15] « Les conférences du Laboratoire national de métrologie et d’essais (LNE) », juin-novembre 2018, consultable en ligne : <https://www.youtube.com/channel/UCJ7oG6qxB4EDBHSRW4f5nQ>
- [16] R. H. Dicke, “The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 17, p. 268–275, 1946.

- [17] H. Plumb and G. Cataland, “Acoustical thermometer and the National Bureau of Standards Provisional Temperature Scale 2–20 (1965)”, *Metrologia*, vol. 2, n° 4, p. 127–139, 1966.
- [18] D. Gagan and G.W. Michel, “Dielectric Constant Gas Thermometry from 4.2 to 27.1 K”, *Metrologia*, vol. 16, n° 4, p. 149–167, 1980.
- [19] C. Daussy et al., “First direct determination of the Boltzmann constant by an optical method”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, n° 25, p. 250801, July 2007.
- [20] J. Fischer et al., “The Boltzmann project”, *Metrologia*, vol. 55, n° 2, p. R1–R20, 2018.
- [21] M. R. Moldover et al., “Acoustic gas thermometry”, *Metrologia*, vol. 51, n° 1, p. R1, January 2014.
- [22] J. B. Johnson, “Thermal Agitation of Electricity in Conductors”, *Nature*, vol. 119, p. 50–51, January 1927.
- [23] H. Nyquist, “Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors”, *Phys. Rev.*, vol. 32, p. 110–113, July 1928.
- [24] G.-W. Truong, E. F. May, T. M. Stace and A. N. Luiten, “Quantitative atomic spectroscopy for primary thermometry”, *Phys. Rev. A*, vol. 83, p. 033805, March 2011 (erratum *Phys. Rev. A*, vol. 85, p. 019909, January 2012).
- [25] D. A. Steck, “Rubidium 85 D Line Data” (revision 2.1.6, 20 September 2013) and “Rubidium 87 D Line Data” (revision 2.1.5, 13 January 2015), consultable en ligne : <https://steck.us/alkalidata/>
- [26] C. Lemarchand, « Mesure de la constante de Boltzmann par spectroscopie laser : vers une contribution au futur Système international d’unités », thèse, Université Paris 13, December 2012, consultable en ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00764087/document>

Annexe 1

Comment ont été fixées les constantes du nouveau Système international d'unités ?

L'exemple de la constante de Boltzmann

Redéfinir le kelvin en fixant la constante de Boltzmann fera donc de facto perdre au point triple de l'eau son statut de système de référence. Afin d'assurer la continuité, la traçabilité et de maintenir les performances des mesures de température, avant qu'elle ne soit fixée, k a du être déterminée expérimentalement avec une incertitude comparable à celle de la réalisation du kelvin dans l'ancien Système international d'unités. Le Comité international des poids et mesures a pour cela considéré que deux critères devaient être satisfaits avant la redéfinition [1] :

- ◆ obtenir une incertitude relative sur la mesure de k inférieure à 1 partie par million (1 ppm) ;
- ◆ que la détermination de k soit obtenue par au moins deux méthodes différentes et avec pour chacune une incertitude relative inférieure à 3 ppm.

C'est dans ce contexte qu'a été initié en 2007, avec le soutien de l'European Association of National Metrology Institutes (EURAMET), le projet Boltzmann. Deux laboratoires français ont pris part à cette collaboration internationale : notre équipe au Laboratoire de physique des lasers (CNRS - Université Paris 13) qui venait alors de démontrer une méthode originale pour mesurer k et le Laboratoire commun de métrologie (LNE-CNAM), laboratoire en pointe dans le domaine de la thermométrie. Le projet Boltzmann a permis de coordonner pendant une décennie les travaux de recherche menés au sein de douze laboratoires répartis dans huit pays. Dans le cadre de cette collaboration internationale, quatre approches expérimentales très différentes et complémentaires ont été retenues pour aboutir à la meilleure détermination possible de la constante de Boltzmann :

- ◆ La mesure du bruit électrique associé à l'agitation thermique des électrons dans un conducteur (le bruit Johnson). C'est la méthode dite « Johnson Noise Thermometry », démontrée en 1946 au Massachusetts Institute of Technology – USA [16].
- ◆ La mesure de la vitesse de propagation du son dans un gaz. C'est la méthode dite « Acoustic Gas Thermometry », démontrée en 1966 au National Bureau of Standards – USA [17].
- ◆ La mesure de la capacité d'un condensateur rempli d'un gaz. C'est la méthode « Dielectric-Constant Gas Thermometry », démontrée en 1980 au H. H. Wills Physics Laboratory – UK [18].

◆ La mesure de l'élargissement Doppler d'une raie d'absorption d'un gaz pour accéder à l'énergie cinétique moyenne de translation des atomes ou des molécules. C'est la méthode « Doppler Broadening Thermometry » que nous avons démontrée en 2007 au Laboratoire de physique des lasers – France [19]. Cette mesure est réalisée par une expérience de spectroscopie laser. À basse pression, la largeur de la raie est dominée par l'effet Doppler directement lié à kT , ce qui permet en mesurant simultanément la fréquence du laser et la température du gaz de déterminer k .

Ces expériences sont toutes basées sur des systèmes pour lesquels la constante de Boltzmann peut complètement s'exprimer en fonction d'autres grandeurs physiques mesurables ou calculables avec une très faible incertitude. La température est bien sûr mesurée en utilisant comme référence le point triple de l'eau.

Le Projet Boltzmann a abouti en juillet 2017 avec la détermination de la constante de Boltzmann : $k = 1,38064903(51) \times 10^{-23} \text{ J/K}$. Cette mesure, à un niveau d'incertitude relative de 0,37 ppm, repose sur onze contributions et plus de deux méthodes expérimentales différentes [20]. Les conditions requises pour pouvoir fixer la valeur numérique de k ont été remplies, ouvrant ainsi la voie vers la redéfinition du kelvin (cf. figure 2).

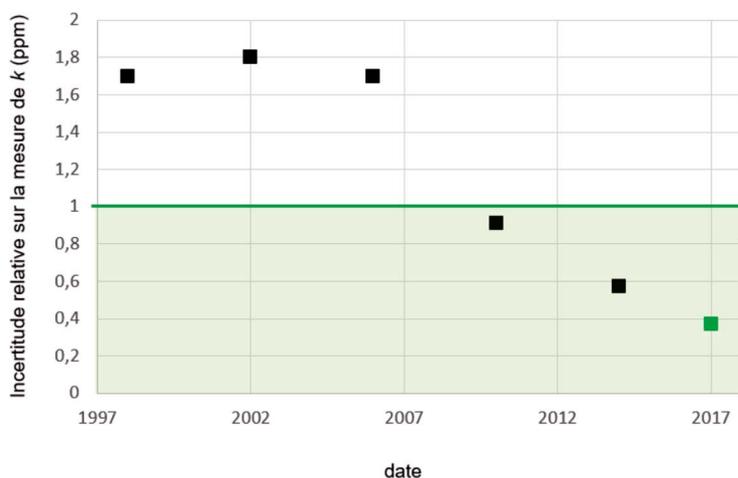


Figure 2 - Évolution au cours des vingt dernières années de la connaissance de la constante de Boltzmann (incertitude relative en partie par million).

Critères requis avant de fixer k pour la redéfinition du kelvin (d'après le Comité international des poids et mesures) :

- Incertitude inférieure à 1 ppm (zone verte).
- Mesure reposant sur au moins deux méthodes différentes et chacune meilleure que 3 ppm (■).

La nouvelle définition du kelvin s'appuiera sur la valeur de k obtenue dans le cadre

du projet Boltzmann ainsi que sur les unités mécaniques pour la définition du joule. L'unité d'énergie sera donnée dans le nouveau Système international d'unités par les valeurs numériques exactes de deux autres constantes : la constante de Planck h (qui s'exprime en joule seconde (J s)) et la fréquence de transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ (qui s'exprime en hertz (s^{-1})).

Annexe 2

Comment mettre en pratique les unités du nouveau Système international d'unités ?

L'exemple du kelvin

Toute expérience permettant de mesurer une température en fonction de constantes fixées dans le nouveau Système international d'unités et d'autres grandeurs physiques mesurables ou calculables avec une très faible incertitude constitue potentiellement une mise en pratique de l'unité de température, donc un thermomètre absolu. Nous présentons ici trois approches qui permettent des mises en pratique simples et pédagogiques du nouveau kelvin. Ces méthodes, inspirées du projet Boltzmann auquel le Laboratoire de physique des lasers a participé (cf. annexe 1), ont été explorées dans le cadre du stage d'Anita Mouttou (deuxième année à l'IUT Mesure physique de l'Université Paris 13, Saint-Denis) et du TIPE (Travaux d'initiative personnelle encadrés) de Charlotte Chavanon (Classe préparatoire au Lycée Clémenceau de Nantes).

1. THERMOMÉTRIE ACOUSTIQUE

La température thermodynamique d'un gaz s'exprime en fonction de sa masse molaire moyenne M , du rapport des chaleurs spécifiques γ , de la vitesse de propagation des ondes acoustiques v dans ce gaz (ou du produit de leur longueur d'onde λ par leur fréquence f) et des constantes k et N_A (fixées dans le nouveau Système international d'unités) par la relation suivante [21] :

$$T = \frac{Mv^2}{\gamma k N_A}.$$

Cette relation pose les bases d'une possible mise en pratique du nouveau kelvin. L'expérience a été réalisée en s'appuyant sur le très classique TP de mesure de la vitesse d'une onde acoustique dans l'air, transformé ici en un prototype de thermomètre acoustique. Dans l'air, $\gamma \approx \frac{7}{5}$ et la température prend la forme approchée :

$$T \approx \frac{5M(\lambda f)^2}{7kN_A}.$$

2. THERMOMÉTRIE ÉLECTRIQUE

La mesure du bruit électrique associé à l'agitation thermique des électrons dans un conducteur permet de concevoir un thermomètre à bruit Johnson [22-23]. Afin d'être détectable, le très faible bruit de tension est mesuré après amplification. La température

s'exprime alors en fonction du bruit de tension $\langle V^2 \rangle$, de la résistance R , du gain $G(f)$ de l'amplificateur et de la constante k (fixée dans le nouveau Système international d'unités) par la relation suivante :

$$T = \frac{\langle V^2 \rangle}{4Rk \int G^2(f) df}.$$

Pour la conception de ce thermomètre électrique, nous nous sommes inspirés de plusieurs énoncés de TP proposés à l'École normale supérieure (ENS) pour la mesure de la constante de Boltzmann. L'amplificateur bas bruit, de gain 100 dB autour de 1 kHz et de bande passante égale à 5 kHz, a été réalisé et qualifié à l'atelier d'électronique du Laboratoire de physique des lasers (cf. figure 3).

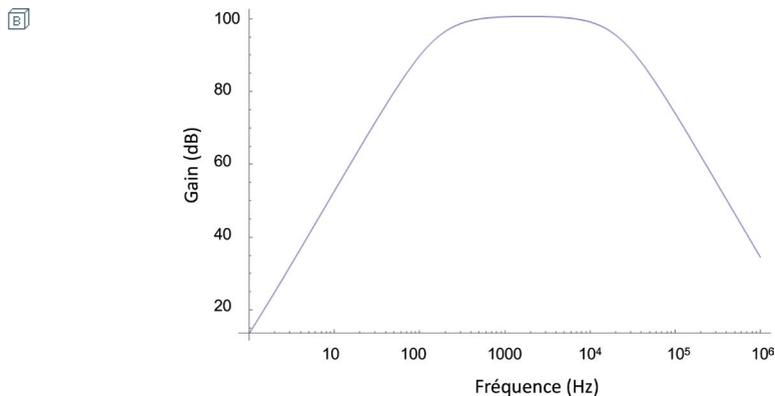
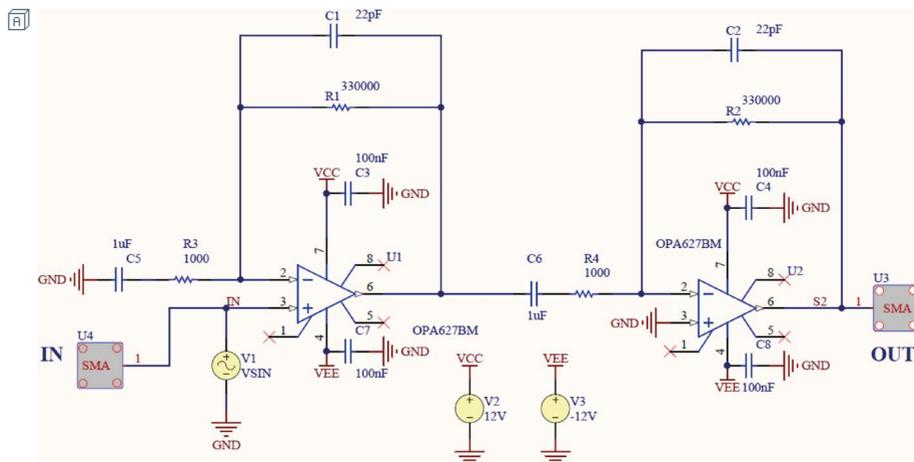


Figure 3 - Schéma  et gain calculé  de l'amplificateur fort gain (100 dB), bas bruit.

Le bruit propre de l'amplificateur est déterminé par une mesure en court-circuit ($R = 0$). Les mesures de thermométrie sont réalisées avec des résistances de précision (autour de 100 à 200 k Ω). Cette méthode présente l'intérêt de permettre des mesures sur une très large gamme de température, de : 77 K (en plongeant la résistance dans l'azote liquide) jusqu'à plus de 400 K (en plaçant la résistance sur une plaque chauffante).

5. THERMOMÉTRIE LASER

La mesure de l'élargissement spectral d'une raie d'absorption dans une vapeur a également été utilisée pour concevoir un thermomètre à effet Doppler. Dans cette expérience, la température de la vapeur s'exprime en fonction de m la masse des particules, de la fréquence de résonance ν_0 , de la largeur Doppler $\Delta\nu$ de la raie d'absorption et des constantes k et c (fixées dans le nouveau Système international d'unités) par la relation : $T = \frac{mc^2}{2k} \left(\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \right)^2$ [19].

L'expérience a été réalisée avec une vapeur de rubidium. Nous avons enregistré les transitions D_2 composées de deux raies pour l'isotope ^{85}Rb et deux raies pour l'isotope ^{87}Rb autour de 780 nm (cf. figure 4) en nous inspirant des travaux de recherche de G.W.Truong *et al.* sur la mesure de la constante de Boltzmann [24].

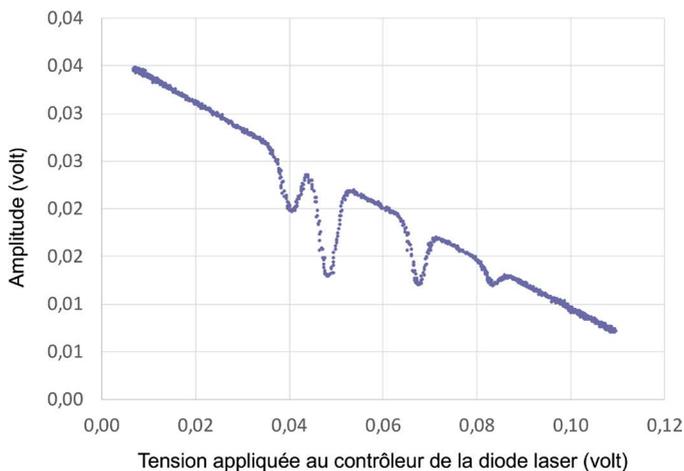


Figure 4 - Spectre d'absorption des raies D_2 des deux isotopes du rubidium (la fréquence de la diode laser (modèle TCLDM9 - THORLABS) diminue lorsque la tension appliquée au contrôleur augmente).

Les masses atomiques ainsi que les fréquences de transition des deux isotopes du

rubidium sont extraites de la littérature avec une très faible incertitude [25]. L'ensemble du spectre est ensuite ajusté par la loi de Beer-Lambert en modélisant chaque composante par un profil de Voigt, produit de convolution d'un profil lorentzien (modélisant l'élargissement collisionnel de la raie) et d'un profil gaussien (modélisant l'élargissement Doppler de la raie) [26]. La largeur Doppler $\Delta\nu$ obtenue permet enfin le calcul de la température du gaz.

Dans la mesure où elles ne reposent que sur des équations de la physique et conduisent à une mesure absolue, ces trois expériences (acoustique, électrique et laser) peuvent toutes être considérées comme des thermomètres primaires. Elles permettent, avec des dispositifs relativement simples et accessibles à des étudiants de premier cycle, de réaliser des mesures de température thermodynamique avec une incertitude relative au niveau de quelques pourcents.



Christophe DAUSSY

Enseignant-chercheur

Docteur en physique (HDR)

Laboratoire de physique des lasers (LPL)

CNRS - Université Paris 13 - Sorbonne Paris Cité

Villetaneuse (Seine-Saint-Denis)



Fabrice WIOTTE

Ingénieur électronicien

Laboratoire de physique des lasers (LPL)

CNRS

Villetaneuse (Seine-Saint-Denis)