

PROJET PHYSIQUE : Mesure de la constante de Boltzmann.

Ce manuscrit présente une expérience totalement nouvelle visant à mesurer la constante de Boltzmann par une méthode de spectroscopie laser. Cette constante est déduite de la largeur à mi-hauteur d'un profil d'absorption linéaire d'un gaz d'ammoniac à température contrôlée. Sur le plan théorique, cette expérience nécessite une analyse très poussée de la forme de raie en absorption linéaire. Dans ce mémoire, je décris les solutions apportées pour obtenir un faisceau laser de fréquence parfaitement contrôlée, largement accordable autour de $10\ \mu\text{m}$ et d'intensité constante. Je décris également les options retenues pour le contrôle en température du gaz d'ammoniac. Les résultats obtenus sont très encourageants, nous avons après seulement 2 ans déjà obtenu une première mesure de la constante de Boltzmann avec une incertitude relative de $1,9 \times 10^{-4}$: $k = 1,38065(26) \times 10^{-23}\ \text{J.K}^{-1}$. Dans ce manuscrit, je présente également plusieurs voies d'amélioration à court et moyen termes. Je présente enfin une expérience de franges de Ramsey-Bordé référencée sur l'étalon primaire de fréquence localisé à Paris (au SYRTE). La chaîne de mesure absolue de fréquence atteint une résolution de 10^{-14} et l'incertitude pour la mesure de la frange centrale est également de l'ordre de 10^{-14} . A moyen terme, ce système de mesure par rapport à l'étalon primaire pourra être utilisé pour contrôler la fréquence du laser à CO_2 dans les futures expériences de mesure de la constante de Boltzmann.

Offre sujet de thèse

Mise en ligne le jeudi 06 novembre 2014



Pourvu

Projet scientifique

La valeur actuelle de la constante de Boltzmann repose essentiellement sur une approche expérimentale : la mesure de la vitesse de propagation du son dans un gaz d'argon ou d'hélium. L'objet de ce projet est de réaliser une nouvelle mesure de cette constante, fondamentale pour toute la physique, par une approche complètement nouvelle. La valeur mesurée sera ensuite transmise au Comité international des poids et mesures (CIPM) pour être prise en compte lors de la future modification de la définition du kelvin. Ce travail s'inscrit dans un projet plus large de redéfinition de l'ensemble des unités du système international à partir de certaines constantes fondamentales telles que la constante de Planck h , la constante de Boltzmann k_B , ou encore la constante d'Avogadro N_A .

Nous développons dans l'équipe une approche nouvelle et originale pour accéder à la constante de Boltzmann. La mesure est réalisée par une expérience de spectroscopie laser qui consiste à mesurer le plus précisément possible le profil Doppler d'une raie d'absorption moléculaire pour une vapeur à l'équilibre thermodynamique. A basse pression, le profil d'absorption observé est dominé par l'élargissement Doppler lié à l'agitation des molécules du gaz. A chaque molécule est associée une valeur de la vitesse et à chaque valeur de la vitesse moléculaire correspond une fréquence décalée par effet Doppler. De ce fait, le profil d'absorption reproduit la distribution gaussienne de Maxwell-Boltzmann des vitesses moléculaires. La largeur de cette gaussienne est directement liée à $k_B T$, d'où la possibilité, en mesurant simultanément la fréquence du laser et la température du gaz, de remonter à la valeur de k_B . La spectroscopie est réalisée dans l'infrarouge (autour de $10\ \mu\text{m}$) dans un gaz moléculaire d'ammoniac à faible pression, maintenu dans un thermostat à une température proche de celle du point triple de l'eau ($273,16\ \text{K}$).

L'étudiant participera au développement et à la caractérisation d'un nouveau spectromètre utilisant une source laser QCL (Quantum Cascade Lasers) à $10\ \mu\text{m}$. Le travail de stage portera plus particulièrement sur le développement d'un nouveau système d'asservissement en intensité de la source laser QCL qui devrait permettre de

démontrer une large réduction du bruit de mesure (et donc de l'incertitude statique sur la mesure de k_B). Le spectromètre laser sera ensuite couplé à une cellule d'absorption multipassage pour la spectroscopie de l'ammoniac. Une étude expérimentale de la forme du profil en absorption linéaire sera poursuivie afin de réduire encore les principales sources d'incertitude dans notre expérience. Enfin, l'étudiant prendra part à une campagne de mesure afin de fournir au CIPM une nouvelle mesure de la constante de Boltzmann.

Le stage sera encadré par un chercheur et un enseignant-chercheur du Laboratoire. Le stage sera rémunéré et pourra éventuellement être prolongé par une thèse au Laboratoire de Physique des Lasers.

La constante de Boltzmann fait partie des constantes fondamentales et elle revêt une importance particulière en physique statistique.

Elle se note k_B , ou tout simplement k , et vaut environ $1.380649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$. Ainsi, comme l'entropie, la constante de Boltzmann a la dimension d'une énergie sur une température.

Constante de Boltzmann et entropie

Cette constante a été introduite pour la première fois par le physicien autrichien Ludwig Boltzmann alors qu'il cherchait à lier l'entropie d'un système thermodynamique à l'équilibre avec le nombre d'états microscopiques distincts accessibles à ce système, compte tenu des contraintes macroscopiques selon la formule :

$$S = k \times \ln \Omega$$

où S désigne l'entropie du système et Ω le nombre d'états microscopiques

La constante de Boltzmann ne doit pas être confondue avec la constante qui apparaît dans la loi de Stefan-Boltzmann qui définit la puissance émise par un corps noir à une température donnée.

Un lien entre énergie et température

La constante de Boltzmann peut également être interprétée, en mécanique statistique, comme faisant le lien entre la température d'un système et son énergie au niveau atomique. L'expression $(\frac{1}{2}) \times k \times T$ désigne ainsi l'énergie d'un degré de liberté en translation.

En d'autres termes, c'est l'énergie cinétique moyenne des particules dans une direction donnée lorsque celles-ci peuvent se déplacer librement dans cette direction et lorsque le système est en état d'équilibre thermodynamique à la température T .

Constante de Boltzmann, nombre d'Avogadro et gaz parfaits

Ce lien entre le monde microscopique et le monde macroscopique est également visible dans la loi des gaz parfaits écrite de la façon suivante :

$$p \times V = N \times k \times T$$

où p figure la pression du gaz, V son volume, T sa température et N le nombre de molécules qu'il contient

Multipliez la constante de Boltzmann par le nombre d'Avogadro et vous obtiendrez donc la constante universelle des gaz parfaits.

Constante de Boltzmann

Constante de Boltzmann

Unités SI

joule par Kelvin

Dimension

$M \cdot L$

$2 \cdot T$

$-2 \cdot \Theta$

-1

Nature

Grandeur scalaire

Symbole usuel

(ou)

Lien à d'autres grandeurs

Valeur

$k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ (valeur exacte)

[modifier](#) 

La **constante de Boltzmann** k (ou k_B) a été introduite par [Ludwig Boltzmann](#) dans sa définition de l'[entropie](#) de [1877](#)¹. Le système étant à l'équilibre macroscopique,

mais libre d'évoluer à l'échelle microscopique entre micro-états différents, son entropie S est donnée par :

où la constante k_B retenue par le [CODATA](#)² vaut (valeur exacte).

La [constante des gaz parfaits](#) est liée à la constante de Boltzmann par la

relation : (avec (valeur exacte) le [nombre d'Avogadro](#), nombre de

particules dans une mole³). D'où :

La constante de Boltzmann est une constante [dimensionnée](#)⁴.

Sa [dimension](#) $[k]$ est $M L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$.

peut s'interpréter comme le facteur de proportionnalité reliant la [température thermodynamique](#) d'un système à son énergie au niveau microscopique, dite [énergie interne](#).

Dans les situations où le [théorème d'équipartition de l'énergie](#) s'applique, la constante de Boltzmann permet de mettre en lien l'énergie thermique et la température :

- est l'expression de l'énergie dans les cas les plus simples avec un seul [degré de liberté](#) ;
- , où est le nombre de degrés de liberté au sens des [coordonnées généralisées](#). Si on prend une particule libre sur un axe, le nombre de degrés de liberté en translation est égal à 1. En revanche, si cette particule est soumise à une force de rappel sinusoïdale (du type ressort), il apparaît un degré de liberté en vibration. Le nombre de degrés de liberté total devient égal à 2.

Cette constante apparaît dans toute la physique. On l'utilise pour convertir une grandeur mesurable, la [température](#) (en kelvins), en une énergie (en joules). Elle intervient par exemple dans :

- [le calcul du spectre électromagnétique du corps noir](#) ;
- les systèmes suivant une [statistique de Maxwell-Boltzmann](#) (ou [loi de distribution des vitesses de Maxwell](#)), notamment la [loi d'Arrhenius](#) ;
- la [constante de Stefan-Boltzmann](#) ;
- la [constante de radiation](#) ;
- l'[énergie interne](#) d'un [gaz parfait](#).



Sommaire

- [1 Histoire](#)
- [2 Valeur](#)
 - [2.1 Dans les unités du Système international](#)
 - [2.2 Valeur en eV/K](#)
 - [2.3 Valeur en Hz/K](#)
- [3 Mesure de la constante de Boltzmann](#)
- [4 Mesure de la constante des gaz parfaits](#)
- [5 Notes et références](#)
- [6 Voir aussi](#)
 - [6.1 Bibliographie](#)
 - [6.1.1 Publications originales](#)
 - [6.1.2 Dictionnaires et encyclopédies](#)
 - [6.1.3 Métrologie](#)
 - [6.2 Articles connexes](#)
 - [6.3 Liens externes](#)

Histoire[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

L'[éponyme](#) de la constante est le physicien autrichien [Ludwig Boltzmann](#) (1844-1906) ^{[6.7](#)}. Elle est ainsi désignée à la suite du physicien allemand [Max Planck](#) (1858-1947) qui l'a introduite en [1900](#) ^{[6.7](#)}. Boltzmann l'a définie et utilisée une fois dans ses écrits, en [1883](#) ^{[8](#)}.

Valeur[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

Dans les unités du Système international[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

Lors de sa 26^e réunion, le 16 novembre 2018, la [Conférence générale des poids et mesures](#) (CGPM) a décidé qu'à compter du 20 mai 2019, le Système international d'unités, le SI, est le système d'unités selon lequel la constante de Boltzmann, k , est égale à $1,380\,649 \times 10^{-23}$ J/K (valeur exacte)⁹.

Dans les unités [SI](#), le [Comité de données pour la science et la technologie](#) (CODATA) recommandait en [2014](#) la valeur suivante² :

²

Avec une incertitude standard de :

Soit une incertitude relative de :

Valeur en eV/K[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

¹⁰

Avec une incertitude standard de :

Valeur en Hz/K[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

¹¹

Avec une incertitude standard de :

Mesure de la constante de Boltzmann[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)



Cet article doit être **actualisé** (décembre 2019).

Des passages de cet article sont désuets ou annoncent des événements désormais passés. [Améliorez-le](#) ou [discutez-en](#). Vous pouvez également préciser les sections à actualiser en utilisant `{{section à actualiser}}`.

La révision du Système international est entrée en vigueur le 20 mai 2019,

voir [Redéfinition du Système international d'unités de 2018-2019](#).

Plusieurs lois physiques peuvent être utilisées pour déterminer la valeur de k :

- la thermométrie acoustique à gaz, qui associe la température à la [vitesse du son](#) et à la [masse molaire](#)¹² ;
- la thermométrie à gaz par mesure de la constante diélectrique, qui associe la température à la [constante diélectrique](#) ou à l'indice de réfraction¹² ;
- la thermométrie à bruit de Johnson, qui associe la température à la puissance de bruit électrique dans une largeur de bande donnée¹² ;
- la thermométrie par mesure de l'élargissement Doppler, qui associe la température à la largeur spectrale d'une résonance d'[absorption optique](#)¹².

La température thermodynamique (unité le kelvin) fait partie des sept unités de base du [Système international d'unités](#) (SI). Dans le cadre de la révision du Système international d'unités (SI) en vigueur depuis le 20 mai 2019, la valeur numérique de cette constante

fondamentale est fixée par le [Comité de données pour la science et la technologie](#) (CODATA). La mesure

de procédait jusque-là de la mesure de et de celle de .

La mesure de a suivi deux voies :

- la mesure du nombre d'atomes dans un cristal de [silicium](#) le plus pur possible (réalisé, mais le prix est très onéreux et peu d'États pourraient payer un tel étalon secondaire) ;
- les [balances du watt](#) donnent maintenant des résultats performants et concordants en exactitude (c'est-à-dire que l'on craint moins les erreurs systématiques car les barres d'erreur se recouvrent).

Néanmoins à terme, il était possible que le [nombre d'Avogadro](#) soit défini *a priori* (ce qui compte, c'est le rapport des masses des atomes. Or les atomes piégeables dans les [Penning traps](#) donnent leur masse à 10^{-10} près). C'est finalement le choix qui a été retenu, ce qui revient

également à fixer .

Mesure de la constante des gaz parfaits

[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

La dernière mesure de [\(constante des gaz parfaits\)](#) est assez ancienne : elle date de [1988](#) au [National Institute of Standards and Technology](#) (NIST). On cherche donc à l'améliorer.

- la mesure de la *vitesse du son* dans un gaz (Moldover), situé dans un résonateur sphérique rempli d'[argon](#), étudiée en fonction de la pression (corrections du viriel) est un exploit technologique assez délicat (variation du volume avec la pression, absorption, désorption). Laurent Pitre opère avec de l'hélium.
- la mesure relative d'une *capacité à gaz* comparée à celle à vide permet de mesurer la [constante diélectrique](#) du gaz et

de remonter *via* la relation de [Clausius-Mossotti](#) à : la précision est 30 ppm avec l'objectif d'atteindre 1 ppm.

- la mesure du *bruit de résistance thermique* (relation de [Nyquist](#)) ne permettra sans doute pas d'atteindre mieux que 20 ppm, en raison de la bande passante.
- la mesure du *rayonnement du corps noir*, *via* la loi de Stefan est limitée à cause de la précision sur l'ouverture (il faut la luminance et non la puissance. Le stéradian intervient) : 30 ppm.

On peut comme en astronomie, définir la [température de couleur](#), mais là c'est l'étalonnage du filtre de bande passante qui est limitant : 100 ppm.

- la mesure de [largeur Doppler d'une raie spectrale](#) paraît finalement la meilleure solution : le thermomètre mesure donc la température en [hertz](#). La cuve actuelle du [LNE](#)-LNM (Paris-XIII) de 250 litres d'un mélange eau-glace à 273,150(3) K contient l'ampoule de gaz [ammoniac](#) NH_3 dont on étudie une raie [IR](#) caractéristique bien cataloguée, de forte absorption (pour obtenir le meilleur rapport signal sur bruit et pour travailler à plus basse pression). Une nouvelle cuve récemment entrée en service permet de tester l'exactitude : avec un spectre en 38 s et environ 500 en 5 h, on atteint les 50 ppm d'incertitude (Daussy, PRL2007).

Mais se posent encore des problèmes non résolus : le tirage par échantillons n'est pas vraiment homogène (erreurs systématiques) : il convient donc de repérer les défauts d'exactitude : alignement optique, rétroaction cuve-banc d'optique, modulation de l'intensité du laser [CO₂](#) (en fréquence et en puissance) et de sa chaîne de balayage.

L'avantage de cette méthode est de pouvoir changer de nombreux paramètres (afin de tester expérimentalement l'exactitude), en particulier changer de gaz, [CH₄](#) ou [SiCl₄](#), etc.

On pourra alors balayer un intervalle de température assez élevé, ce qui améliorera considérablement l'EIT 90 (Échelle internationale de température 1990).

Il est possible qu'à terme, on s'aperçoive que d'autres transitions de phase soient meilleures, puis si on prend l'habitude de mesurer les températures en [hertz](#), c'est-à-dire en [joules](#), *via* la donnée imposée de la [constante de Planck](#), (soit en [eV](#), si on a la charge de l'électron avec assez de précision), alors on aura réalisé un thermomètre gradué directement en Hz et eV : la boucle se refermera car beaucoup de physiciens des basses températures utilisent

déjà cette *unité*. Or n'est jamais que le *facteur de conversion* J/K.

Ce type de situation a déjà été vécu : il fut un temps où l'unité de chaleur était la calorie et l'unité de travail le joule et la calorie par joule s'appelait J et était tabulée par CODATA : $J \sim 4,185\,5 \text{ cal/J}$. Ensuite on a décidé de prendre la même unité pour la chaleur et le travail, compte tenu du [premier principe de la thermodynamique](#) et de l'expérience de [Joule](#) (1845).

Alors la constante de Boltzmann se « fossilisera ». L'entropie se mesurera en [bits](#) ou en [octets](#) et sera ce qu'elle est réellement : une grandeur sans dimension (mais avec des unités puisqu'il s'agit de $z \rightarrow \ln z$: unités le [néper](#) et le [radian](#)).

Notes et références[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

- ↑ (en) [Ludwig Boltzmann](#), *Lectures on Gas Theory*, [Dover Publications](#), 1964([ISBN 0-486-68455-5](#))
- ↑ Revenir plus haut en : a b et c « The NIST Reference on Constants, Units, Uncertainty : Boltzmann constant *k* » [\[archive\]](#)
- ↑ « The NIST Reference on Constants, Units, Uncertainty : Avogadro Constant *N_A*, *L* » [\[archive\]](#)
- ↑ [Uzan et Lehoucq 2005](#), p. 41.
- ↑ [Dubesset 2000](#), s.v. constante de Boltzmann, p. 50.
- ↑ Revenir plus haut en : a et b [Gupta 2020](#), chap. 8, § 8.1, p. 189.
- ↑ Revenir plus haut en : a et b [Taillet, Villain et Febvre 2018](#), s.v. Boltzmann (constante de), p. 83, col. 1.
- ↑ [Darrigol 2018](#), p. XXIV.
- ↑ <https://www.bipm.org/utls/fr/pdf/CGPM/Draft-Resolution-A-FR.pdf> [\[archive\]](#)
- ↑ « The NIST Reference on Constants, Units, Uncertainty : Boltzmann constant in eV/K *k* » [\[archive\]](#)
- ↑ « The NIST Reference on Constants, Units, Uncertainty : Boltzmann constant in Hz/K *k/h* » [\[archive\]](#)
- ↑ Revenir plus haut en : a b c et d [Pitre et Sadli 2019](#), p. 30, col. 1.

Voir aussi[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

Bibliographie[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

- [CGPM 2019] [Conférence générale des poids et mesures](#), *Comptes rendus de la 26^e réunion de la Conférence générale des poids et mesures (Versailles, 13-16 novembre 2018)*, Sèvres, [Bureau international des poids et mesures](#), décembre 2019, 1^{re} éd., 560 p., 30 cm ([ISBN 978-92-822-2276-8](#), [lire en ligne \[archive\]](#)).
- C. Daussy, M. Guinet, A. Amy-Klein, K. Djerroud, S. Briaudeau, Y. Hermier, Ch. J. Bordé et C. Chardonnet, « *Spectroscopic determination of the Boltzmann constant: first results* », *Physical Review Letters* 98, 250801 (2007)
- [Dubesset 2000] Michel Dubesset (préf. de Gérard Grau), *Le manuel du Système international d'unités : lexique et conversions*, Paris, Technip, coll. « [Publications de l'Institut français du pétrole](#) » (n° 20), sept. 2000, 1^{re} éd., 1 vol., XX-169 p., ill., fig. et tabl., 15 × 22 cm, br. ([ISBN 2-7108-0762-9](#), [EAN 9782710807629](#), [OCLC 300462332](#), notice [BnF](#) n° [FRBNF37624276](#), [SUDOC 052448177](#), [présentation en ligne \[archive\]](#), [lire en ligne \[archive\]](#)).
- [Darrigol 2018] (en) [Olivier Darrigol](#), *Atoms, mechanics, and probability : Ludwig Boltzmann's statistico-mechanical writings – an exegesis* [« Atomes, mécanique et probabilités : les écrits de mécanique statistique de Ludwig Boltzmann – une exégèse »], Oxford, OUP, hors coll., fév. 2018, 1^{re} éd., 1 vol., XXVI-612 p., ill. et fig., 16,8 × 24 cm, rel. ([ISBN 978-0-19-881617-1](#), [EAN 9780198816171](#), [OCLC 1034791008](#), notice [BnF](#) n° [FRBNF45463085](#), [DOI 10.1093/oso/9780198816171.001.0001](#), [SUDOC 227342291](#), [présentation en ligne \[archive\]](#), [lire en ligne \[archive\]](#)).
- [Gupta 2020] (en) S. V. Gupta, *Units of measurement : history, fundamentals and redefining the SI base units* [« Les unités de mesure : histoire, fondements et redéfinition des unités de base du SI »], Cham et New Delhi, [Springer](#) et MSI, coll. « Springer series in materials science » (n° 122), juin 2020, 2^e éd. (1^{re} éd. nov. 2009), 1 vol., XXIII-304 p., ill., fig. et tabl., 15,6 × 23,4 cm, rel. ([ISBN 978-3-030-43968-2](#), [EAN 9783030439682](#), [OCLC 1141991798](#), [DOI 10.1007/978-3-030-43969-9](#), [présentation en ligne \[archive\]](#), [lire en ligne \[archive\]](#)), chap. 8 (« Boltzmann constant defining kelvin K ») [« La constante de Boltzmann définissant le kelvin K »], p. 189-211 ([OCLC 8615164422](#), [DOI 10.1007/978-3-030-43969-9_8 \[archive\]](#)).
- [Uzan et Lehoucq 2005] [Jean-Philippe Uzan](#) et [Roland Lehoucq](#), *Les constantes fondamentales*, Paris, [Belin](#), coll. « Belin Sup / histoire des sciences / physique », mai 2005, 1^{re} éd., 1 vol., 487 p., ill. et fig., 17 × 24 cm, br. ([ISBN 2-7011-3626-1](#), [EAN 9782701136264](#), [OCLC 300532710](#), notice [BnF](#) n° [FRBNF39295528](#), [SUDOC 087569523](#), [présentation en ligne \[archive\]](#), [lire en ligne \[archive\]](#)).

Publications originales[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

- [Boltzmann 1884] (de) [Ludwig Boltzmann](#), « Über das Arbeitsquantum, welches bei chemischen Verbindungen gewonnen werden kann », *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*, vol. 88, n° 2, 1884, p. 861-896 ([lire en ligne](#) [archive](#) [PDF]).

Dictionnaires et encyclopédies[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

- [Taillet, Villain et Febvre 2018] Richard Taillet, Loïc Villain et Pascal Febvre, *Dictionnaire de physique*, Louvain-la-Neuve, [De Boeck Supérieur](#), hors coll. / sciences, janv. 2018, 4^e éd. (1^{re} éd. mai 2008), X-956 p., ill. et fig., 17 x 24 cm, br. ([ISBN 978-2-8073-0744-5](#), [EAN 9782807307445](#), [OCLC 1022951339](#), notice [BnF](#) n° [FRBNF45646901](#), [SUDOC 224228161](#), [présentation en ligne](#) [archive](#), [lire en ligne](#) [archive](#)), s.v. Boltzmann (constante de), p. 83, col. 1.

Métrologie[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

- [Julien *et al.* 2019] Lucile Julien, François Nez, Matthieu Thomas, Patrick Espel, Djamel Ziane, Patrick Pinot, François Piquema, Pierre Cladé, Saïda Guellati-Khélifa, Sophie Djordjevic, Wilfrid Poirier, Félicien Schopfer, Olivier Thévenot, Laurent Pitre et Mohamed Sadli, « Le nouveau Système international d'unités : le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin redéfinis », *Reflète phys.*, n° 62 : « Le nouveau Système international d'unités », juin 2019, p. 11-31 ([DOI 10.1051/refdp/201962011](#), [résumé](#) [archive](#), [lire en ligne](#) [archive](#) [PDF]) :
 - [Pitre et Sadli 2019] Laurent Pitre et Mohamed Sadli, « Le kelvin révisé et la constante de Boltzmann », *Reflète phys.*, n° 62, juin 2019, p. 29-31.

Articles connexes[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

- [Thermométrie](#)
- [Système International d'unités](#)

Liens externes[\[modifier\]](#) | [modifier le code](#)

- [Mesure de la constante de Boltzmann](#) [archive](#) (CNRS)
- [OI] (en) « [Boltzmann constant](#) » [archive](#) [« Constante de Boltzmann »], notice d'autorité n° 20110803095516331 de l'*Oxford Index* [OI], sur la base de données *Oxford Reference* de l'[OUP](#).

[\[masquer\]](#)

[v](#) • [m](#)

Lois des [gaz](#)

[Variables](#) et [constantes](#)

Variables [intensives](#)

[pression](#)

		volume molaire température thermodynamique facteur de compressibilité
	Variables extensives	volume quantité de matière
	Constantes	constante universelle des gaz parfaits constante de Boltzmann nombre d'Avogadro
	Caractéristiques des corps purs	pression, température, volume molaire masse molaire facteur acentrique
Gaz parfait	Loi des gaz parfaits	loi d'Avogadro loi de Boyle-Mariotte loi de Charles loi de Gay-Lussac
	Mélange de gaz parfaits	loi d'Amagat loi de Dalton théorème de Gibbs
Gaz réel	Équations d'état	Dieterici cubiques van der Waals Redlich-Kwong équation du viriel
	Équilibre liquide-vapeur	diagramme de phase pression de vapeur saturante règle du palier de Maxwell fugacité loi de Raoult loi de Henry

Vers une nouvelle détermination de la constante de Boltzmann

Image



Image



Objectifs

Résumé et premiers résultats

Impacts scientifiques et industriels

Publications et communications

Début du projet : 2006

Mise à jour le 1 juin 2018

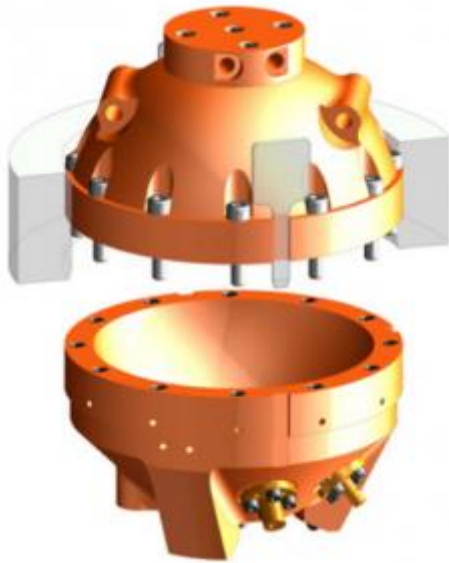
-
-

L'unité de température, le kelvin, est défini sur la base d'un artefact, la cellule au point triple de l'eau. La température générée par une telle cellule est sujette à divers facteurs d'influence (pression dans la cellule, impuretés dans l'eau, composition isotopique de l'eau...) qui engendrent une incertitude non négligeable.

Objectifs

Déterminer la constante de Boltzmann à $1 \cdot 10^{-6}$ **en vue de la redéfinition du kelvin**

Résumé et premiers résultats



Vue CAO de la cavité « BCU3 » (méthode acoustique)

L'incertitude sur le point de référence que constitue le point triple de l'eau est aujourd'hui de l'ordre de $100 \mu\text{K}$, ce qui est supérieur aux différences de températures qui peuvent être détectées avec les thermomètres actuels (de l'ordre de quelques μK). La définition actuelle du kelvin n'est donc plus satisfaisante.

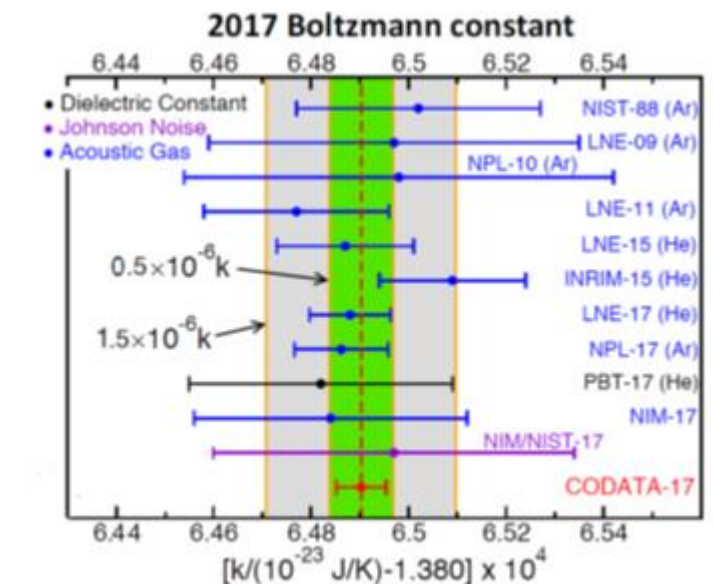
Dans ce contexte, la communauté internationale des métrologues travaille à redéfinir le kelvin à partir d'une constante fondamentale dont la valeur numérique serait figée comme cela a été fait pour le mètre en 1983 avec la vitesse de la lumière. La constante choisie est la constante de Boltzmann k , reliant la température thermodynamique au quantum d'énergie d'agitation thermique, ce qui aura comme avantage de ne favoriser aucune température ni aucune méthode pour sa mesure. Afin qu'une telle redéfinition puisse être réalisée, il est nécessaire qu'une incertitude suffisamment faible soit obtenue sur la valeur de la constante de Boltzmann, de l'ordre de $1 \cdot 10^{-6}$ en valeur relative, et qu'un consensus international puisse être établi sur la base des valeurs issues d'un nombre suffisant de laboratoires nationaux de métrologie.

En France les travaux reposent essentiellement sur deux méthodes :

- la méthode spectroscopique, dont les travaux sont menés par l'équipe HOTES au LPL (Laboratoire de physique des lasers, Université Paris 13) ;
- la méthode acoustique, dont les travaux sont menés au LCM.

Avec la méthode spectroscopique qui a été mise en œuvre par le LPL, la valeur de k est déduite de la mesure de l'élargissement Doppler d'une résonance moléculaire optique d'un gaz d'ammoniac à l'équilibre thermodynamique. Il s'agit d'une mesure directe de la distribution des vitesses des molécules du gaz qui suit la loi de distribution des vitesses de Maxwell Boltzmann dans des conditions d'équilibre. La résonance moléculaire est ici sondée par spectroscopie d'absorption linéaire de la molécule d'ammoniac. Pour une pression du gaz suffisamment faible, la largeur Doppler du spectre d'absorption du laser à résonance moléculaire dépend du produit $k \cdot T$, avec T la température thermodynamique du gaz. La détermination de k devient accessible à une température suffisamment proche de la

température du point triple de l'eau. Après une première expérience de démonstration menée au LPL, qui a conduit à une détermination de k avec une incertitude de $2 \cdot 10^{-4}$, une expérience de deuxième génération a été mise au point. L'étude des effets systématiques a permis dès 2012 d'atteindre un budget d'incertitude au niveau de 2 ppm et de contribuer significativement à la détermination de la constante de Boltzmann par la voie spectroscopique. Suite à l'optimisation du montage, le laboratoire a publié une nouvelle évaluation de son incertitude en septembre 2015 : l'incertitude calculée par des méthodes de type B est $2,3 \cdot 10^{-6}$.



Meilleures déterminations de k ces dernières années

Avec la méthode acoustique qui a été mise en œuvre par le LCM, la valeur de k est déduite de la mesure de la vitesse du son dans un gaz rare en cavité fermée. Tous les paramètres de l'expérience (pureté du gaz, pression statique, température de l'ensemble, forme exacte de la cavité, mesure de signaux acoustiques) doivent être maîtrisés avec une grande exactitude. Il en va de même pour les modèles théoriques desquels sont déduits les termes correctifs à appliquer aux résultats expérimentaux. Si la détermination mise en œuvre au LNE-LCM/Cnam reprend sur le principe la méthode développée au NIST par M.R. Moldover en 1988 (qui avait conduit à la meilleure détermination de la constante de Boltzmann), celle-ci introduit des modifications et améliorations dans la mesure des paramètres permettant d'accéder à k .

Le laboratoire français a publié 4 déterminations de la constante de Boltzmann par la méthode acoustique. Les trois premières déterminations ont été effectuées avec des résonateurs de 0,5 L en utilisant de l'argon ou de l'hélium-4. La dernière a été effectuée avec une quasi-sphère de 3 L en utilisant de l'hélium-4 : c'est le meilleur résultat obtenu à l'échelle internationale. Les 4 déterminations de la valeur de la constante de Boltzmann qui ont été publiées par le LCM sont reproduites ci-contre dans le tableau et tracées sur la figure qui reprend les meilleures déterminations de ces dernières années. L'objectif d'incertitude de l'ordre de $1 \cdot 10^{-6}$ en valeur relative est atteint.

Expérience	Gaz	Résonateur	$k \times 10^{23}$ (J·K ⁻¹)
LNE 1 (2009)	He	BCU2v2	1,380 649 6
LNE 2 (2011)	Ar	BCU3	1,380 647 7
LNE 3 (2015)	He	BCU3	1,380 648 7
LNE 4 (2017)	He	BCU4	1,380 648 78

Impacts scientifiques et industriels

- Redéfinition du kelvin en utilisant une constante de la physique
- Évolution de la mise en pratique de la définition du kelvin

Publications et communications

PITRE L., SPARASCI F., TRUONG D., GUILLOU A., RISEGARI L. et HIMBERT M.E., “Measurement of the Boltzmann Constant k_B Using a Quasi-Spherical Acoustic Resonator”, *International Journal of Thermophysics*, **32**, 2011, 1825-1886, DOI: [10.1007/S10765-011-1023-X](https://doi.org/10.1007/S10765-011-1023-X).

DE PODESTA M., MAY E.F., MEHL J.B., PITRE L., GAVIOSO R.M., BENEDETTO G., GIULIANO ALBO P.A., TRUONG D. et FLACK D., “Characterization of the volume and shape of quasi-spherical resonators using coordinate measurement machines”, *Metrologia*, **47**, 5, 2010, 588-604, DOI: [10.1088/0026-1394/47/5/010](https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/5/010).

TRUONG D., SPARASCI F., FOLTETE E., OUISSE M. et PITRE L., “Measuring shell resonances of spherical acoustic resonators”, *International Journal of Thermophysics*, **32**, 2011, 427-440, DOI: [10.1007/S10765-010-0846-1](https://doi.org/10.1007/S10765-010-0846-1).

GAVIOSO R.M., MADONNA RIPA D., GUIANVARC'H C., BENEDETTO G., GIULIANO ALBO P.A., CUCCARO R., PITRE L. et TRUONG D., “Shell perturbations of an acoustic thermometer determined from speed of sound in gas mixtures”, *Int. J. Thermophys.*, **31**, 8-9, 2010, 1739-1748, DOI: [10.1007/S10765-010-0831-8](https://doi.org/10.1007/S10765-010-0831-8).

SUTTON G., UNDERWOOD R., PITRE L., DE PODESTA M. et VALKIERIS S., “Acoustic resonator experiments at the triple point of water: first results for the Boltzmann constant and remaining challenges”, *Int. J. Thermophys.*, **31**, 7, 2010, 1310-1346, DOI: [10.1007/S10765-010-0722-Z](https://doi.org/10.1007/S10765-010-0722-Z).

UNDERWOOD R., MEHL J.B., PITRE L., EDWARDS G.J., SUTTON G. et DE PODESTA M., “Waveguide effects on quasispherical microwave cavity resonators”, *Meas. Sci. Technol.*, **21**, 7, 2010, 075103, DOI: [10.1088/0957-0233/21/7/075103](https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/7/075103).

HIMBERT M., “Traceability to SI in a near future” (invited), *6th Intern. Conf on Instrumentation C2i*, Le Mans, France, janvier 2010, Hermès-Lavoisier ed., 2010, 1-8.

HIMBERT M., “SI units and fundamental physics” (invited), *3rd Rus. Workshop on Precision physics and fundamental physics constants*, St Petersburg, Russia, déc. 2010, [HTTP://PHYSICS.VNIIM.RU/SI50/](http://physics.vniim.ru/SI50/)

PITRE L., GUIANVARC'H C., SPARASCI F., GUILLOU A., TRUONG D., HERMIER Y. et HIMBERT M., "An improved acoustic method for the determination of the Boltzmann constant at LNE-INM/CNAM", *C.R. Académie des sciences ; Physique*, **10**, 9, 2009, 835-848.

GUIANVARC'H C., GAVIOSO R.M., BENEDETTO G., PITRE L. et BRUNEAU M., "Characterization of condenser microphones under different environmental conditions for accurate speed of sound measurements with acoustic resonators", *Rev. Sci. Instrum.*, **80**, 2009, 074901.

GUIANVARC'H C., PITRE L., BRUNEAU M. et BRUNEAU A.-M., "Acoustic field in a quasi-spherical resonator: unified perturbation model", *J. Acoust. Soc. Am.*, **125**, 2009, 1416-1425.

PITRE L., GUIANVARC'H C., SPARASCI F., RICHARD A. et TRUONG D., "Progress towards an acoustic/microwave determination of the Boltzmann constant at LNE-INM/CNAM", *Int.J. Thermophys.*, **29**, 5, 2008, 1730-1739, DOI: [10.1007/S10765-008-0481-2](https://doi.org/10.1007/S10765-008-0481-2)

SPARASCI F., PITRE L. et HERMIER Y., "Realization of the triple point of water in metallic sealed cells at the LNE-INM/CNAM: A Progress Report", *Int.J. Thermophys.*, **29**, 3, 2008, 825-835.

GUIANVARC'H C., PITRE L., SPARASCI F., GUILLOU A., TRUONG D., HERMIER Y., BRUNEAU M. et BRUNEAU A.-M., « Méthode acoustique pour la détermination de la constante de Boltzmann », *Revue française de métrologie*, **16**, 2008, 37-47.

GAVIOSO R.M., MADONNA RIPA D., GUIANVARC'H C., BENEDETTO G., GIULIANO ALBO P.A., CUCCARO R., PITRE L. et TRUONG D., "Shell perturbations of an acoustic thermometer determined from speed of sound in gas mixtures", *Int. J. Thermophys.*, **31**, 8-9, 2010, 1739-1748, DOI: [10.1007/S10765-010-0831-8](https://doi.org/10.1007/S10765-010-0831-8).

PITRE L., SPARASCI F., TRUONG D., GUILLOU A., RISEGARI L. et HIMBERT M., "Determination of the Boltzmann constant using a quasi-spherical acoustic resonator", *Phil. Trans. R. Soc. A*, **369**, 2011, 4014-4027, DOI: [10.1098/RSTA.2011.0197](https://doi.org/10.1098/RSTA.2011.0197).

MOLDOVER M.R., GAVIOSO R.M., MEHL J.B., PITRE L., DE PODESTA M. et ZHANG J.T., "Acoustic gas thermometry", *Metrologia*, **51**, 2014, DOI: [10.1088/0026-1394/51/1/R1](https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/1/R1).

YANG I., PITRE L., MOLDOVER M.R., ZHANG J., FENG X. et KIM J.S., "Improving acoustic determinations of the Boltzmann constant with mass spectrometer measurements of the molar mass of argon", *Metrologia*, **52**, 2015, S394-S409, DOI: [10.1088/0026-1394/52/5/S394](https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/5/S394).

PITRE L., et al., "New measurement of the Boltzmann constant k by acoustic thermometry of helium-4 gas", *Metrologia*, **54**, 2017, 856-873

Mesure de la constante de Boltzmann par procédé acoustique en cavité, étude du couplage fluide/structure par mesures acoustiques et électromagnétiques en mélange gazeux

[Cécile Guianvarc'H](#)^{1,*} [Roberto Gavioso](#)¹ [Daniele Madonna Ripa](#)¹ [Giuliana Benedetto](#)¹ [Rugiada Cuccaro](#)¹ [Daniel Truong](#)² [Laurent Pitre](#)² [Détails](#)

* Auteur correspondant

¹ [INRiM - Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica](#)

² [LCM - Laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM](#)

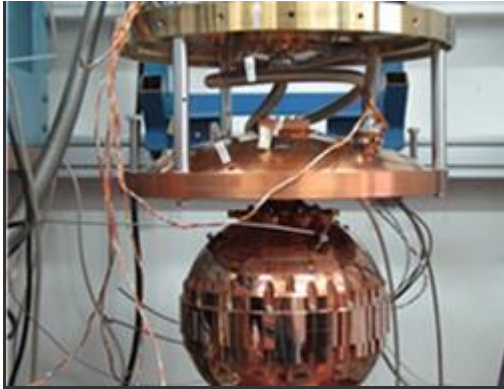
Résumé : La communauté scientifique internationale cherche depuis quelques années à définir le kelvin à partir d'une constante fondamentale dont la valeur numérique serait figée. Pour que l'unité de température fasse l'objet d'une telle redéfinition, cette constante, la constante de Boltzmann k_B , devra être connue avec une incertitude relative inférieure à 10^{-6} . La méthode choisie ici pour la détermination de k_B repose sur la mesure des fréquences de résonance acoustiques d'un gaz pur en cavité quasi sphérique. Le niveau de précision accessible actuellement grâce aux techniques de mesures mises en œuvre ici impose une précision du même ordre pour la modélisation acoustique associée à cette expérience. Les modèles analytiques étudiés doivent ainsi tenir compte des effets couplés de diverses sources de perturbations (imperfections de sphéricité, effets visqueux et thermiques, transducteurs, discontinuités en paroi...), et des couplages intermodaux résultants. L'accent est mis ici sur la compréhension du couplage fluide/structure dont les effets, bien que significatifs, ne peuvent toujours pas être pris en compte dans les modèles analytiques avec une précision suffisante. Une méthode expérimentale reposant sur la mesure de fréquences de résonance acoustiques et électromagnétiques dans un mélange gazeux de composition variable a donc été mise au point à l'INRiM afin d'étudier la réponse de la coque à différents modes acoustiques. La variation progressive de la composition du gaz (de l'hélium à l'argon pur) permet de faire varier significativement la vitesse du son, et ainsi la fréquence de résonance de chaque mode acoustique, sur plusieurs milliers à dizaines de milliers de Hertz. Les premiers résultats expérimentaux ont permis d'identifier des modes de résonance de la coque susceptibles de perturber fortement la détermination de k_B . Par-delà, une telle étude présente également un intérêt pour la mesure des propriétés physiques de mélanges gazeux par méthodes acoustiques et électromagnétiques.

Le nouveau kelvin défini par la constante de Boltzmann

Publication: Juillet 2017
Partagez sur

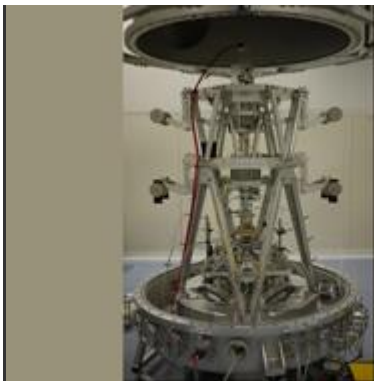
- [fb](#)
- [tw](#)
- [tw](#)

Le LNE obtient des résultats remarquables à la veille de la redéfinition du kelvin et du kilogramme...



En 2018, à l'occasion de la 26e Conférence générale des poids et mesures, quatre unités du Système international d'unités (le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole) devraient être redéfinies. Ces dernières devraient être établies sur la base de constantes fondamentales de la physique. Cela nécessite d'affiner au mieux les valeurs de ces constantes : les chercheurs du LNE viennent d'obtenir des résultats remarquables sur les valeurs de la constante de Boltzmann, pour la redéfinition du kelvin, et de la constante de Planck, pour la redéfinition du kilogramme.

Une définition à revoir



Depuis 1968 le système international d'unité définit le kelvin comme la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau qui correspond donc à $0,01^\circ\text{C}$ soit $273,16\text{ K}$. Mais le point triple de l'eau est un artefact qui, à mesure qu'on l'étudie, révèle ses défauts (composition isotopique, impuretés...).

Le kelvin devrait donc bientôt être défini à partir d'une constante fondamentale : la constante de Boltzmann. Dont la valeur numérique sera figée, comme cela a été fait pour la vitesse de la lumière en 1983 pour la définition du mètre. Le kelvin sera alors défini comme la constante de Boltzmann (k) reliée au quantum d'énergie d'agitation thermique kT , T étant la température thermodynamique. Aujourd'hui la constante de Boltzmann est estimée à environ $1,380\,648\,52 \times 10^{-23}$ joule par kelvin, avec une incertitude relative de $0,57 \times 10^{-6}$, définie par le Comité de données pour la science et la technologie (CODATA), qui préconise une liste de valeurs des constantes physiques fondamentales. Mais il reste à affiner la valeur de cette constante.

Le thermomètre acoustique

L'équipe LNE-Cnam/LCM a mis au point une méthode originale permettant de déduire la valeur de la constante de Boltzmann grâce à la mesure de la vitesse du son dans un gaz rare en cavité fermée. Les chercheurs ont ainsi placé de l'hélium-4 dans un résonateur quasi-sphérique de 3 litres. Ce thermomètre acoustique est fondé sur la détermination précise des résonances acoustiques et micro-ondes pour mesurer la vitesse du son à différentes pressions. Cette expérience est exigeante car tous les paramètres de l'expérience (pureté du gaz, mesure des signaux acoustiques) doivent être maîtrisés avec une grande exactitude.

Un résultat record

L'équipe est ainsi parvenue à déterminer la constante de Boltzmann avec une incertitude de 0.60×10^{-6} . A ce jour au meilleur niveau mondial ! Ces travaux ont été acceptés en juin 2017 dans la revue Metrologia.

Le kilogramme défini par la constante de Planck, déterminée à partir d'une balance de Kibble

La définition actuelle : L'étalon de l'unité de masse est un cylindre de platine iridié conservé depuis 1889 au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres. Le « grand K », comme il est surnommé, est gardé en sécurité, dans un caveau, sous trois cloches de verre : sa masse est par définition exactement égale à 1 kg. Mais cet artefact matériel présente aujourd'hui ses limites puisqu'il n'est disponible que dans un seul lieu, et surtout, il n'est pas stable dans le temps.. En effet, au cours des quatre comparaisons effectuées en un siècle et demi, on a noté des incohérences entre la masse du « grand K » et celle ses copies. Ce dernier ne permet plus aujourd'hui une mesure certaine des masses. Pour s'affranchir de ces limites, le kilogramme sera bientôt défini à partir de la constante de Planck (h). Reste encore à déterminer avec la meilleure exactitude possible la valeur de cette constante universelle.

La balance de Kibble

La méthode utilisée par les équipes du LNE pour déterminer la constante de Planck est celle de la balance de Kibble (auparavant nommée balance du watt). Cette expérience consiste à comparer une puissance mécanique à une puissance électrique virtuelle déterminée en se référant à l'effet Josephson et à l'effet Hall quantique. Elle permet, de ce fait, de raccorder l'unité de masse, le kilogramme, à la constante de Planck. Cette expérience électromécanique aux réglages délicats suppose par ailleurs de maîtriser simultanément les grandeurs masse, accélération de la pesanteur, temps, longueur, tension et résistance à des incertitudes proches de celles de l'état de l'art.

La balance de Kibble du LNE, développée depuis 2002, a fourni récemment une valeur de la constante de Planck : $6.626\,070\,41 \times 10^{-34}$ Js, avec une incertitude relative de 5.7×10^{-8} . Ces résultats ont été publiés dans la revue Metrologia en juin 2017, et devraient permettre de contribuer au choix d'une valeur fixée de la constante de Planck pour la redéfinition du kilogramme.

Après la redéfinition du kilogramme par le choix d'une valeur fixée de la constante de Planck en 2018, la balance de Kibble du LNE permettra la réalisation de l'unité de masse, et cela sans référence au « grand K » : le kilogramme sera dématérialisé, sa valeur ne reposant que sur des constantes de la physique.

Thomas Grenon, directeur général du LNE « *La recherche est au coeur de la mission de service public du LNE et occupe une place centrale dans l'ensemble de nos activités, qu'elle soit fondamentale, pour la redéfinition des unités du SI dans laquelle nous sommes fortement mobilisés, ou appliquée. Après la création d'un étalon quantique de l'ampère l'an dernier, le LNE confirme, avec ces deux résultats, sa place de laboratoire français de référence dans le domaine de la mesure.* »

Constante de Boltzmann - Boltzmann constant Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre À ne pas confondre avec la constante de Stefan-Boltzmann . Valeurs de k Unités $1,380\,649 \times 10^{-23}$ J · K⁻¹ $8,617\,333\,262\,145 \times 10^{-5}$ eV · K⁻¹ $1,380\,649 \times 10^{-16}$ erg · K⁻¹ Pour plus de détails, voir § Valeur en différentes unités ci-dessous. Les première et troisième valeurs sont exactes; le second est exactement égal à $1380649 / 16021766340$. Voir la section liée pour plus de détails. La constante de Boltzmann (k_B ou k) est le facteur de proportionnalité qui relie l'énergie cinétique relative moyenne des particules dans un gaz à la température thermodynamique du gaz. Cela se produit dans les définitions du kelvin et de la constante des gaz , ainsi que dans la loi de Planck du rayonnement du corps noir et

la formule d'entropie de Boltzmann . La constante de Boltzmann a des dimensions d'énergie divisées par la température, comme l' entropie . Il porte le nom du scientifique autrichien Ludwig Boltzmann . Dans le cadre de la redéfinition de 2019 des unités de base SI , la constante de Boltzmann est l'une des sept « constantes de définition » qui ont reçu des définitions exactes. Ils sont utilisés dans diverses combinaisons pour définir les sept unités de base SI. La constante de Boltzmann est définie comme étant exactement $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$.

Contenu

- 1 Rôles de la constante de Boltzmann
- 1.1 Rôle dans l'équipartition de l'énergie
- 1.2 Rôle dans les facteurs de Boltzmann
- 1.3 Rôle dans la définition statistique de l'entropie
- 1.4 La tension thermique
- 2 Histoire
- 3 Valeur en différentes unités
- 3.1 Unités Planck
- 4 Voir aussi
- 5 notes
- 6 Références
- 7 Liens externes

Rôles de la constante de Boltzmann

Relations entre les lois des gaz de Boyle , Charles , Gay-Lussac , Avogadro , combinées et parfaites , avec la constante de Boltzmann $k_B = R / N_A = n R / N$ (dans chaque loi, les propriétés entourées sont variables et les propriétés non entourées sont maintenues constantes) Macroscopiquement, la loi des gaz parfaits stipule que, pour un gaz parfait , le produit de la pression p et du volume V est proportionnel au produit de la quantité de substance n (en moles) et de la température absolue T : où R est la constante molaire des gaz ($8,314\,462\,618\,153\,24 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} \cdot\text{mol}^{-1}$). L'introduction de la constante de Boltzmann comme constante de gaz par molécule $k = R / N_A$ transforme la loi des gaz parfaits en une forme alternative: où N est le nombre de molécules de gaz. Pour $n = 1 \text{ mol}$, N est égal au nombre de particules dans une mole (le nombre d'Avogadro) .

Rôle dans l'équipartition de l'énergie

Article principal: Equipartition d'énergie

Etant donné un système thermodynamique à une température absolue T , l'énergie thermique moyenne portée par chaque degré de liberté microscopique du système est $1 / 2 kT$ (c'est-à-dire, environ $2,07 \times 10^{-21} \text{ J}$, ou $0,013 \text{ eV}$, à température ambiante). En mécanique statistique classique , cette moyenne devrait être exacte pour les gaz parfaits homogènes . Les gaz parfaits monatomiques (les six gaz rares) possèdent trois degrés de liberté par atome, correspondant aux trois directions spatiales, ce qui signifie une énergie thermique de $3 / 2 kT$ par atome. Cela correspond très bien aux données expérimentales. L'énergie thermique peut être utilisée pour calculer la vitesse quadratique moyenne des atomes, qui s'avère être inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse atomique . Les vitesses quadratiques moyennes trouvées à température ambiante reflètent précisément cela, allant de 1370 m / s pour l' hélium , jusqu'à 240 m / s pour le xénon . La théorie cinétique donne la pression moyenne p pour un gaz parfait comme

Combinaison avec la loi des gaz parfaits montre que l'énergie cinétique de translation moyenne est

Considérant que le vecteur vitesse de mouvement de translation v a trois degrés de liberté (un pour chaque dimension) donne l'énergie moyenne par degré de liberté égale à un tiers de cela, c'est-à-dire $1 / 2 kT$. L'équation des gaz parfaits est également étroitement obéie par les gaz moléculaires; mais la forme de la capacité thermique est plus compliquée, car les molécules possèdent des degrés de liberté internes supplémentaires, ainsi que les trois degrés de liberté pour le mouvement de la molécule dans son ensemble. Les gaz diatomiques, par exemple, possèdent un total de six degrés de liberté simple par molécule qui sont liés au mouvement atomique (trois en translation, deux en rotation et un en vibration). À des températures plus basses, tous ces degrés de liberté ne peuvent pas participer pleinement à la capacité thermique du gaz, en raison des limites mécaniques quantiques sur la disponibilité des états excités à l'énergie thermique pertinente par molécule.

Rôle dans les facteurs de Boltzmann

Plus généralement, les systèmes en

équilibre à la température T ont une probabilité P_i d'occuper un état i d'énergie E_i pondérée par le facteur de Boltzmann correspondant : où Z est la fonction de partition . Encore une fois, c'est la quantité de type énergie kT qui prend une importance centrale. Les conséquences de ceci incluent (en plus des résultats pour les gaz parfaits ci-dessus) l'équation d'Arrhenius en cinétique chimique . Rôle dans la définition statistique de l'entropie Informations complémentaires: Entropie (thermodynamique statistique) Tombe de Boltzmann dans le Zentralfriedhof , Vienne, avec formule buste et entropie. En mécanique statistique, l'entropie S d'un système isolé à l'équilibre thermodynamique est définie comme le logarithme naturel de W , le nombre d'états microscopiques distincts disponibles pour le système compte tenu des contraintes macroscopiques (comme une énergie totale fixe E) : Cette équation, qui relie les détails microscopiques, ou micro-états, du système (via W) à son état macroscopique (via l'entropie S), est l'idée centrale de la mécanique statistique. Telle est son importance qu'il est inscrit sur la pierre tombale de Boltzmann. La constante de proportionnalité k sert à rendre l'entropie mécanique statistique égale à l'entropie thermodynamique classique de Clausius: On pourrait choisir à la place une entropie sans dimension redimensionnée en termes microscopiques de telle sorte que C'est une forme plus naturelle et cette entropie redimensionnée correspond exactement à l'entropie d'information ultérieure de Shannon . L'énergie caractéristique kT est donc l'énergie nécessaire pour augmenter l'entropie redimensionnée d'un nat . La tension thermique Dans les semi - conducteurs , l'équation diode de Shockley -le rapport entre le flux de courant électrique et le potentiel électrostatique à travers une jonction p-n -depend sur une tension caractéristique appelée la tension thermique , notée V_T . La tension thermique dépend de la température absolue T car où q est l'amplitude de la charge électrique sur l'électron avec une valeur $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C De manière équivalente, À la température ambiante de 300 K (27 ° C; 80 ° F), V_T est d'environ 25,85 mV . et à la température d'état standard de 298,15 K (25,00 ° C; 77,00 ° F), il est d'environ 25,69 mV . La tension thermique est également importante dans les plasmas et les solutions électrolytiques (par exemple l'équation de Nernst); dans les deux cas, il fournit une mesure de la mesure dans laquelle la distribution spatiale des électrons ou des ions est affectée par une frontière maintenue à une tension fixe. Histoire La constante de Boltzmann porte le nom de son découvreur autrichien du XIXe siècle, Ludwig Boltzmann . Bien que Boltzmann ait lié pour la première fois l'entropie et la probabilité en 1877, la relation n'a jamais été exprimée avec une constante spécifique jusqu'à ce que Max Planck introduise pour la première fois k , et lui donne une valeur plus précise ($1,346 \times 10^{-23}$ J / K , environ 2,5% de moins que le chiffre actuel), dans sa dérivation de la loi du rayonnement du corps noir en 1900–1901. Avant 1900, les équations impliquant des facteurs de Boltzmann n'étaient pas écrites en utilisant les énergies par molécule et la constante de Boltzmann, mais plutôt en utilisant une forme de la constante des gaz R et des énergies macroscopiques pour les quantités macroscopiques de la substance. La forme emblématique de l'équation $S = k \ln W$ sur la pierre tombale de Boltzmann est en fait due à Planck, et non à Boltzmann. Planck l'a en fait introduit dans le même ouvrage que son éponyme h . En 1920, Planck écrivit dans sa conférence du prix Nobel : Cette constante est souvent appelée la constante de Boltzmann, bien qu'à ma connaissance, Boltzmann lui-même ne l'ait jamais introduite - un état de fait particulier, qui peut s'expliquer par le fait que Boltzmann, comme il ressort de ses déclarations occasionnelles, n'a jamais pensé à la possibilité d'effectuer une mesure exacte de la constante. Cet "état de choses particulier" est illustré par référence à l'un des grands débats scientifiques

de l'époque. Il y avait un désaccord considérable dans la seconde moitié du dix-neuvième siècle sur la question de savoir si les atomes et les molécules étaient réels ou s'ils étaient simplement un outil heuristique pour résoudre des problèmes. Il n'y avait pas d'accord si les molécules chimiques, mesurées par les poids atomiques, étaient les mêmes que les molécules physiques, telles que mesurées par la théorie cinétique. La conférence de Planck en 1920 a continué: Rien ne peut mieux illustrer le rythme positif et trépidant des progrès réalisés par l'art des expérimentateurs au cours des vingt dernières années, que le fait que depuis lors, non seulement une, mais un grand nombre de méthodes ont été découvertes pour mesurer la masse d'une molécule avec pratiquement la même précision que celle obtenue pour une planète. Dans les versions de SI antérieures à la redéfinition de 2019 des unités de base SI, la constante de Boltzmann était une quantité mesurée plutôt qu'une valeur fixe. Sa définition exacte a également varié au fil des ans en raison des redéfinitions du kelvin (voir Kelvin § History) et d'autres unités de base SI (voir Joule § History). En 2017, les mesures les plus précises de la constante de Boltzmann ont été obtenues par thermométrie acoustique des gaz, qui détermine la vitesse du son d'un gaz monoatomique dans une chambre ellipsoïdale triaxiale à l'aide de résonances micro-ondes et acoustiques. Cet effort d'une décennie a été entrepris avec différentes techniques par plusieurs laboratoires; c'est l'une des pierres angulaires de la redéfinition 2019 des unités de base SI. Sur la base de ces mesures, le CODATA a recommandé $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ comme valeur fixe finale de la constante de Boltzmann à utiliser pour le Système international d'unités. Valeur en différentes unités

Valeurs de k	Unités	commentaires
$1,380\,649 \times 10^{-23}$	J / K	SI par définition, J / K = m ² · kg / (s ² · K)
$8,617\,333\,262 \times 10^{-5}$	eV / K	
$2,083\,661\,912 \times 10^{10}$	Hz / K	(k / h)
$1,380\,649 \times 10^{-16}$	erg / K	Système CGS, 1 erg = 1×10^{-7} J
$3,297\,623\,483 \times 10^{-24}$	cal / K	1 calorie = $4,1868 \text{ J}$
$1\,832\,013\,046 \times 10^{-24}$	cal / °R	
$5,657\,302\,466 \times 10^{-24}$	ft lb / °R	
$0,695\,034\,800$	cm ⁻¹ / K	(k / (hc))
0,001 985 875	kcal / (mol · K)	(kN A)
0,008 314 463	kJ / (mol · K)	(kN A)
-228,599 1672	dB (W / K / Hz)	10 log 10 (k / (1 W / K / Hz)), utilisé pour les calculs de bruit thermique

Puisque k est un facteur de proportionnalité entre la température et l'énergie, sa valeur numérique dépend du choix des unités d'énergie et de température. La petite valeur numérique de la constante de Boltzmann en unités SI signifie qu'un changement de température de 1 K ne modifie l'énergie d'une particule que d'une petite quantité. Un changement de 1 °C est défini comme étant identique à un changement de 1 K. L'énergie caractéristique kT est un terme rencontré dans de nombreuses relations physiques. La constante de Boltzmann établit une relation entre la longueur d'onde et la température (la division de hc / k par une longueur d'onde donne une température), un micromètre étant lié à 14 387 0,777 K, et aussi une relation entre la tension et la température (multipliant la tension par k en unités de eV / K) avec un volt étant lié à 11 604 0,518 K. Le rapport de ces deux températures, $14\,387\,0,777 \text{ K} / 11\,604\,0,518 \text{ K} \approx 1,239842$, est la valeur numérique de hc en unités de eV · μm.

Unités Planck La constante de Boltzmann fournit une cartographie de cette énergie microscopique caractéristique E à l'échelle de température macroscopique $T = E / k$. Dans la recherche en physique, une autre définition est souvent rencontrée en fixant k à l'unité, résultant en unités de Planck ou unités naturelles de température et d'énergie. Dans ce contexte, la température est mesurée efficacement en unités d'énergie et la constante de Boltzmann n'est pas explicitement nécessaire. La formule d'équipartition de l'énergie associée à chaque degré de liberté classique devient alors L'utilisation d'unités naturelles simplifie de nombreuses relations physiques; sous cette forme, la définition de l'entropie

thermodynamique coïncide avec la forme de l'entropie d'information : où P_i est la probabilité de chaque micro-état . La valeur choisie pour une unité de la température de Planck est celle correspondant à l'énergie de la masse de Planck . Voir également CODATA 2018 Bêta thermodynamique Remarques Les références Liens externes
Projet de chapitre 2 pour la brochure SI, suite à la redéfinition des unités de base (préparé par le Comité consultatif des unités) Grand pas en avant vers la redéfinition du kelvin: les scientifiques trouvent une nouvelle façon de déterminer la constante de Boltzmann Constante de Boltzmann - https://fr.qaz.wiki/wiki/Boltzmann_constant

<http://www.lne.fr/>

Constante de Boltzmann - Boltzmann constant Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre À ne pas confondre avec la constante de Stefan-Boltzmann . Valeurs de k Unités $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ $8,617\,333\,262\,145 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$ $1,380\,649 \times 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1}$ Pour plus de détails, voir § Valeur en différentes unités ci-dessous. Les première et troisième valeurs sont exactes; le second est exactement égal à $1380649 / 16021766340$. Voir la section liée pour plus de détails. La constante de Boltzmann (k_B ou k) est le facteur de proportionnalité qui relie l'énergie cinétique relative moyenne des particules dans un gaz à la température thermodynamique du gaz. Cela se produit dans les définitions du kelvin et de la constante des gaz , ainsi que dans la loi de Planck du rayonnement du corps noir et la formule d'entropie de Boltzmann . La constante de Boltzmann a des dimensions d'énergie divisées par la température, comme l'entropie . Il porte le nom du scientifique autrichien Ludwig Boltzmann . Dans le cadre de la redéfinition de 2019 des unités de base SI , la constante de Boltzmann est l'une des sept « constantes de définition » qui ont reçu des définitions exactes. Ils sont utilisés dans diverses combinaisons pour définir les sept unités de base SI. La constante de Boltzmann est définie comme étant exactement $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$. Contenu 1 Rôles de la constante de Boltzmann 1.1 Rôle dans l'équipartition de l'énergie 1.2 Rôle dans les facteurs de Boltzmann 1.3 Rôle dans la définition statistique de l'entropie 1.4 La tension thermique 2 Histoire 3 Valeur en différentes unités 3.1 Unités Planck 4 Voir aussi 5 notes 6 Références 7 Liens externes Rôles de la constante de Boltzmann Relations entre les lois des gaz de Boyle , Charles , Gay-Lussac , Avogadro , combinées et parfaites , avec la constante de Boltzmann $k_B = R / N_A = n R / N$ (dans chaque loi, les propriétés entourées sont variables et les propriétés non entourées sont maintenues constantes) Macroscopiquement, la loi des gaz parfaits stipule que, pour un gaz parfait , le produit de la pression p et du volume V est proportionnel au produit de la quantité de substance n (en moles) et de la température absolue T : où R est la constante molaire des gaz ($8,314\,462\,618\,153\,24 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) . L'introduction de la constante de Boltzmann comme constante de gaz par molécule $k = R / N_A$ transforme la loi des gaz parfaits en une forme alternative: où N est le nombre de molécules de gaz. Pour $n = 1 \text{ mol}$, N est égal au nombre de particules dans une mole (le nombre d'Avogadro) . Rôle dans l'équipartition de l'énergie Article principal: Equipartition d'énergie Etant donné un système thermodynamique à une température absolue T , l'énergie thermique moyenne portée par chaque degré de liberté microscopique du système est $1/2 kT$ (c'est-à-dire, environ $2,07 \times 10^{-21} \text{ J}$, ou $0,013 \text{ eV}$, à température ambiante). En mécanique statistique classique , cette moyenne devrait être exacte pour les gaz parfaits homogènes . Les gaz parfaits monatomiques (les six gaz rares) possèdent trois degrés de liberté par atome, correspondant aux trois directions spatiales, ce qui signifie une énergie thermique de $3/2 kT$ par atome. Cela correspond très bien aux données expérimentales. L'énergie thermique peut être utilisée pour calculer la

vitesse quadratique moyenne des atomes, qui s'avère être inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse atomique . Les vitesses quadratiques moyennes trouvées à température ambiante reflètent précisément cela, allant de 1370 m / s pour l' hélium , jusqu'à 240 m / s pour le xénon . La théorie cinétique donne la pression moyenne p pour un gaz parfait comme Combinaison avec la loi des gaz parfaits montre que l'énergie cinétique de translation moyenne est Considérant que le vecteur vitesse de mouvement de translation v a trois degrés de liberté (un pour chaque dimension) donne l'énergie moyenne par degré de liberté égale à un tiers de cela, c'est-à-dire $1/2 kT$. L'équation des gaz parfaits est également étroitement obéie par les gaz moléculaires; mais la forme de la capacité thermique est plus compliquée, car les molécules possèdent des degrés de liberté internes supplémentaires, ainsi que les trois degrés de liberté pour le mouvement de la molécule dans son ensemble. Les gaz diatomiques, par exemple, possèdent un total de six degrés de liberté simple par molécule qui sont liés au mouvement atomique (trois en translation, deux en rotation et un en vibration). À des températures plus basses, tous ces degrés de liberté ne peuvent pas participer pleinement à la capacité thermique du gaz, en raison des limites mécaniques quantiques sur la disponibilité des états excités à l'énergie thermique pertinente par molécule. Rôle dans les facteurs de Boltzmann Plus généralement, les systèmes en équilibre à la température T ont une probabilité P_i d'occuper un état i d'énergie E_i pondérée par le facteur de Boltzmann correspondant : où Z est la fonction de partition . Encore une fois, c'est la quantité de type énergie kT qui prend une importance centrale. Les conséquences de ceci incluent (en plus des résultats pour les gaz parfaits ci-dessus) l'équation d'Arrhenius en cinétique chimique . Rôle dans la définition statistique de l'entropie Informations complémentaires: Entropie (thermodynamique statistique) Tombe de Boltzmann dans le Zentralfriedhof , Vienne, avec formule buste et entropie. En mécanique statistique, l'entropie S d'un système isolé à l'équilibre thermodynamique est définie comme le logarithme naturel de W , le nombre d'états microscopiques distincts disponibles pour le système compte tenu des contraintes macroscopiques (comme une énergie totale fixe E): Cette équation, qui relie les détails microscopiques, ou micro-états, du système (via W) à son état macroscopique (via l'entropie S), est l'idée centrale de la mécanique statistique. Telle est son importance qu'il est inscrit sur la pierre tombale de Boltzmann. La constante de proportionnalité k sert à rendre l'entropie mécanique statistique égale à l'entropie thermodynamique classique de Clausius: On pourrait choisir à la place une entropie sans dimension redimensionnée en termes microscopiques de telle sorte que C'est une forme plus naturelle et cette entropie redimensionnée correspond exactement à l' entropie d'information ultérieure de Shannon . L'énergie caractéristique kT est donc l'énergie nécessaire pour augmenter l'entropie redimensionnée d'un nat . La tension thermique Dans les semi - conducteurs , l' équation diode de Shockley -le rapport entre le flux de courant électrique et le potentiel électrostatique à travers une jonction p-n -depend sur une tension caractéristique appelée la tension thermique , notée V_T . La tension thermique dépend de la température absolue T car où q est l'amplitude de la charge électrique sur l'électron avec une valeur $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C De manière équivalente, À la température ambiante de 300 K (27 ° C; 80 ° F), V_T est d'environ 25,85 mV . et à la température d' état standard de 298,15 K (25,00 ° C; 77,00 ° F), il est d'environ 25,69 mV . La tension thermique est également importante dans les plasmas et les solutions électrolytiques (par exemple l'équation de Nernst); dans les deux cas, il fournit une mesure de la mesure dans laquelle la distribution spatiale des électrons ou des ions est affectée par une frontière maintenue à une tension fixe. Histoire La constante de Boltzmann porte le nom de son découvreur autrichien du XIXe siècle, Ludwig Boltzmann . Bien que Boltzmann ait lié pour la première fois l'entropie

et la probabilité en 1877, la relation n'a jamais été exprimée avec une constante spécifique jusqu'à ce que Max Planck introduise pour la première fois k , et lui donne une valeur plus précise ($1,346 \times 10^{-23} \text{ J / K}$, environ 2,5% de moins que le chiffre actuel), dans sa dérivation de la loi du rayonnement du corps noir en 1900–1901. Avant 1900, les équations impliquant des facteurs de Boltzmann n'étaient pas écrites en utilisant les énergies par molécule et la constante de Boltzmann, mais plutôt en utilisant une forme de la constante des gaz R et des énergies macroscopiques pour les quantités macroscopiques de la substance. La forme emblématique de l'équation $S = k \ln W$ sur la pierre tombale de Boltzmann est en fait due à Planck, et non à Boltzmann. Planck l'a en fait introduit dans le même ouvrage que son éponyme h . En 1920, Planck écrivit dans sa conférence du prix Nobel : Cette constante est souvent appelée la constante de Boltzmann, bien qu'à ma connaissance, Boltzmann lui-même ne l'ait jamais introduite - un état de fait particulier, qui peut s'expliquer par le fait que Boltzmann, comme il ressort de ses déclarations occasionnelles, n'a jamais pensé à la possibilité d'effectuer une mesure exacte de la constante. Cet "état de choses particulier" est illustré par référence à l'un des grands débats scientifiques de l'époque. Il y avait un désaccord considérable dans la seconde moitié du dix-neuvième siècle sur la question de savoir si les atomes et les molécules étaient réels ou s'ils étaient simplement un outil heuristique pour résoudre des problèmes. Il n'y avait pas d'accord si les molécules chimiques, mesurées par les poids atomiques, étaient les mêmes que les molécules physiques, telles que mesurées par la théorie cinétique. La conférence de Planck en 1920 a continué: Rien ne peut mieux illustrer le rythme positif et trépidant des progrès réalisés par l'art des expérimentateurs au cours des vingt dernières années, que le fait que depuis lors, non seulement une, mais un grand nombre de méthodes ont été découvertes pour mesurer la masse de une molécule avec pratiquement la même précision que celle obtenue pour une planète. Dans les versions de SI antérieures à la redéfinition de 2019 des unités de base SI, la constante de Boltzmann était une quantité mesurée plutôt qu'une valeur fixe. Sa définition exacte a également varié au fil des ans en raison des redéfinitions du kelvin (voir Kelvin § History) et d'autres unités de base SI (voir Joule § History). En 2017, les mesures les plus précises de la constante de Boltzmann ont été obtenues par thermométrie acoustique des gaz, qui détermine la vitesse du son d'un gaz monoatomique dans une chambre ellipsoïdale triaxiale à l'aide de résonances micro-ondes et acoustiques. Cet effort d'une décennie a été entrepris avec différentes techniques par plusieurs laboratoires; c'est l'une des pierres angulaires de la redéfinition 2019 des unités de base SI. Sur la base de ces mesures, le CODATA a recommandé $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ comme valeur fixe finale de la constante de Boltzmann à utiliser pour le Système international d'unités. Valeur en différentes unités Valeurs de k Unités commentaires $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J / K}$ SI par définition, $\text{J / K} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} / (\text{s}^2 \cdot \text{K})$ en unités de base SI $8,617\,333\,262 \times 10^{-5} \text{ eV / K}$ $2,083\,661\,912 \times 10^{10} \text{ Hz / K}$ (k / h) $1,380\,649 \times 10^{-16} \text{ erg / K}$ Système CGS, $1 \text{ erg} = 1 \times 10^{-7} \text{ J}$ $3,297\,623\,483 \times 10^{-24} \text{ cal / K}$ 1 calorie = $4,1868 \text{ J}$ $832\,013\,046 \times 10^{-24} \text{ cal / }^\circ \text{R}$ $5,657\,302\,466 \times 10^{-24} \text{ ft} \cdot \text{lb} / ^\circ \text{R}$ $0,695\,034\,800 \text{ cm}^{-1} / \text{K}$ (k / (hc)) $0,001\,985\,875 \text{ kcal / (mol} \cdot \text{K)}$ (kN A) $0,008\,314\,463 \text{ kJ / (mol} \cdot \text{K)}$ (kN A) $-228,599\,1672 \text{ dB (W / K / Hz)}$ $10 \log_{10} (\text{k / (1 W / K / Hz)})$, utilisé pour les calculs de bruit thermique Puisque k est un facteur de proportionnalité entre la température et l'énergie, sa valeur numérique dépend du choix des unités d'énergie et de température. La petite valeur numérique de la constante de Boltzmann en unités SI signifie qu'un changement de température de 1 K ne modifie l'énergie d'une particule que d'une petite quantité. Un changement de 1°C est défini comme étant identique à un changement de 1 K. L'énergie caractéristique kT est un terme rencontré dans de nombreuses relations physiques. La

constante de Boltzmann établit une relation entre la longueur d'onde et la température (la division de hc / k par une longueur d'onde donne une température), un micromètre étant lié à 14 387 0,777 K , et aussi une relation entre la tension et la température (multipliant la tension par k en unités de eV / K) avec un volt étant lié à 11 604 0,518 K . Le rapport de ces deux températures, 14 387 0,777 K / 11 604 0,518 K \approx 1,239842, est la valeur numérique de hc en unités de eV· μ m. Unités Planck La constante de Boltzmann fournit une cartographie de cette énergie microscopique caractéristique E à l'échelle de température macroscopique $T = E / k$. Dans la recherche en physique, une autre définition est souvent rencontrée en fixant k à l'unité, résultant en unités de Planck ou unités naturelles de température et d'énergie. Dans ce contexte, la température est mesurée efficacement en unités d'énergie et la constante de Boltzmann n'est pas explicitement nécessaire. La formule d'équipartition de l'énergie associée à chaque degré de liberté classique devient alors L'utilisation d'unités naturelles simplifie de nombreuses relations physiques; sous cette forme, la définition de l'entropie thermodynamique coïncide avec la forme de l'entropie d'information : où P_i est la probabilité de chaque micro-état . La valeur choisie pour une unité de la température de Planck est celle correspondant à l'énergie de la masse de Planck . Voir également CODATA 2018 Bêta thermodynamique Remarques Les références Liens externes Projet de chapitre 2 pour la brochure SI, suite à la redéfinition des unités de base (préparé par le Comité consultatif des unités) Grand pas en avant vers la redéfinition du kelvin: les scientifiques trouvent une nouvelle façon de déterminer la constante de Boltzmann Constante de Boltzmann - https://fr.qaz.wiki/wiki/Boltzmann_constant

LA CONSTANTE DE BOLTZMANN NOUVELLE EST ARRIVÉE !

Le Cnam à l'origine d'une nouvelle révolution en métrologie !

Le groupe de thermométrie du LCM, le laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam, dans un projet dirigé par Laurent Pitre, a produit la meilleure détermination mondiale de la constante de Boltzmann, qui sera employée pour redéfinir l'unité de température, le kelvin.

Une grande découverte au sein du laboratoire de métrologie du Cnam !

Qui?

Laurent Pitre et le [groupe de thermométrie](#) du laboratoire [LCM \(laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam\)](#).

Quoi

Une nouvelle révolution se déroule en métrologie. La Révolution française a conduit au mètre et au kilogramme, jusqu'au système international d'unités de nos jours, mieux connu sous le nom de SI. Le SI est fondé sur sept unités de base : le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, la mole, la candela et le kelvin. Toutes les autres unités peuvent être dérivées de ces sept. Depuis la Convention du mètre de 1875, les définitions des unités ont généralement été raffinées toutes les deux ou trois décennies. Aujourd'hui, une seule unité, le mètre, est basée sur la valeur d'une constante fondamentale de la physique, c'est-à-dire la vitesse de la lumière sous vide, dont la valeur a été fixée une fois pour toutes en 1983.

Tout cela est maintenant sur le point de changer. **À partir de 2018, les définitions des unités de base seront reformulées.** Quatre d'entre elles, à savoir celles du kilogramme, de la mole, de l'ampère et du kelvin seront fondés sur des valeurs fixes de constantes fondamentales, afin d'assurer leur pérennité et leur universalité. Des groupes de recherche dans le monde entier ont été en compétition, à partir du début des années 2000, pour parvenir aux déterminations les plus précises de ces constantes. Ces travaux ont été officiellement arrêtés le 30 juin 2017, pour permettre au [Comité pour les données en science et technologie](#) (CODATA) de produire des valeurs mondiales moyennes de ces constantes, qui serviront à définir les unités.

Pour ce qui concerne l'unité de température, le kelvin, sa définition a été, jusqu'à présent, « la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau », c'est-à-dire le point où la glace, l'eau liquide et la vapeur d'eau coexistent. Malheureusement, aucun échantillon d'eau n'est identique, ce qui met en danger la pérennité et l'universalité de la définition du kelvin. **La nouvelle définition de 2018 utilisera une valeur fixe de la constante de Boltzmann.**

En France, après plus d'une décennie de travail et plusieurs mesures marquantes, et face à la concurrence parfois féroce des principaux laboratoires internationaux, le [groupe de thermométrie](#) du [LCM](#), dans un projet dirigé par Laurent Pitre, **a produit la meilleure détermination mondiale de la constante de Boltzmann.** L'incertitude de cette détermination se situe entre 4,8 et 5,6 parties par 10 millions. La technique utilisée, la thermométrie acoustique, a été la mesure de la vitesse du son dans un gaz de composition connue, réalisée précisément à la température du point triple de l'eau. La valeur de la constante de Boltzmann déterminée par le LCM a été récemment acceptée pour publication dans la revue [Metrologia](#). Elle contribuera à hauteur de 55% à la moyenne mondiale.

Une fois que le kelvin aura été redéfini en 2018, les températures seront mesurables de manière continue avec une incertitude meilleure que la partie par million, sur une plage de plusieurs centaines de kelvin, à partir des températures proches du zéro absolu, jusqu'au-delà de la température ambiante, ce qui sera une véritable révolution.

Allons plus loin... qu'est-ce que la constante de Boltzmann ?

La constante de Boltzmann k (ou kB) a été introduite par Ludwig Boltzmann dans sa définition de l'entropie de 1877 alors qu'il cherchait à lier l'entropie d'un système thermodynamique à l'équilibre avec le nombre d'états microscopiques distincts accessibles à ce système, compte tenu des contraintes macroscopiques selon la formule : $S = k \times \ln \Omega$ où S désigne l'entropie du système et Ω le nombre d'états microscopiques

L'entropie... ou la mesure du désordre !

Le terme entropie désigne, dans la thermodynamique classique, une fonction d'état extensive. En d'autres termes, une fonction d'état proportionnelle à la quantité de matière en présence.

La thermodynamique statistique permet de préciser que l'entropie caractérise le désordre microscopique d'un système, son degré de désorganisation. L'entropie d'un système rend donc compte du degré de dispersion de l'énergie (thermique, chimique, etc.) au sein même du système. Et selon le deuxième principe de la thermodynamique, l'énergie d'un système isolé a tendance à se disperser le plus possible. Son entropie a donc, de même, tendance à augmenter.

La constante de Boltzmann fait partie des constantes fondamentales et elle revêt une importance particulière en physique statistique.

Elle se note kB, ou tout simplement k, et vaut environ **1,380 648 8 x 10⁻²³ J.K⁻¹**. Ainsi, comme l'entropie, la constante de Boltzmann a la dimension d'une énergie sur une température.

Un lien entre énergie et température

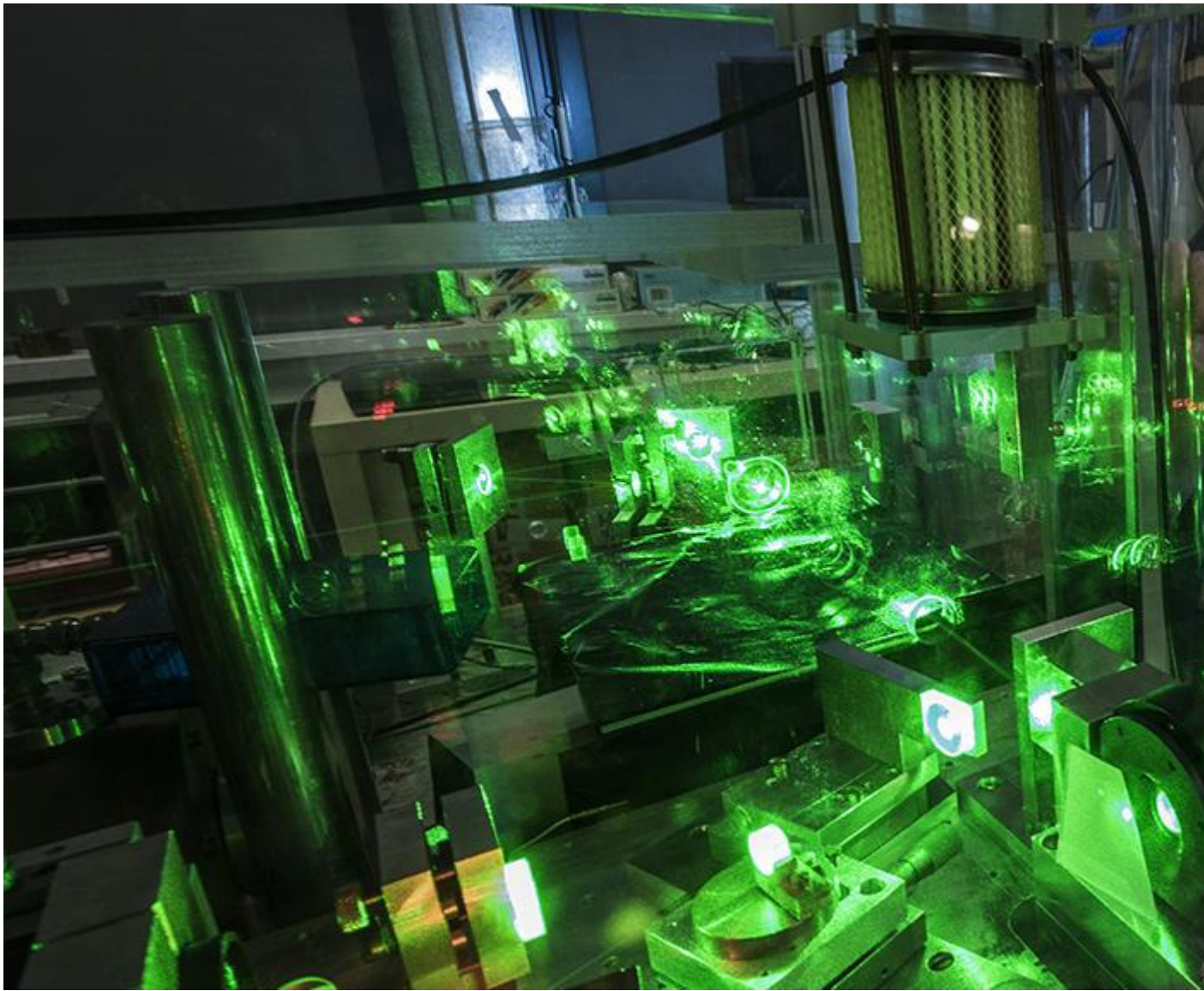
La constante de Boltzmann peut également être interprétée, en mécanique statistique, comme faisant le lien entre la température d'un système et son énergie au niveau atomique. L'expression $(\frac{1}{2}) \times k \times T$ désigne ainsi l'énergie d'un degré de liberté en translation. En d'autres termes, c'est l'énergie cinétique moyenne des particules dans une direction donnée lorsque celles-ci peuvent se déplacer librement dans cette direction et lorsque le système est en état d'équilibre thermodynamique à la température T.

Constante de Boltzmann, nombre d'Avogadro et gaz parfaits
Ce lien entre le monde microscopique et le monde macroscopique est également visible dans la loi des gaz parfaits écrite de la façon suivante : $p \times V = N \times k \times T$ où p figure la pression du gaz, V son volume, T sa température et N le nombre de molécules qu'il contient. Multipliez la constante de Boltzmann par le nombre d'Avogadro et vous obtiendrez donc la constante universelle des gaz parfaits.

Ces
constantes
qui
donnent la
mesure

07.09.2018, par

[Yaroslav Pigenet](#)



Hubert RAGUET/LKB/CNRS Photothèque

Partager

En rattachant explicitement toutes les unités de base à des constantes fondamentales, la future réforme du Système international parachèvera l'objectif d'universalité et de stabilité des mesures des inventeurs du système métrique. Mais sur quoi au juste repose ce lien entre mesure, unités et constantes ?

En physique, comme dans la vie quotidienne, mesurer revient à déterminer le rapport entre deux quantités de même nature dont l'une – supposée constante – fait office d'étalon ou d'unité. Le corps humain a longtemps fourni des étalons pratiques et toujours disponibles pour, par exemple, mesurer en pieds, en

pouces ou en coudées, la distance entre deux objets. L'ennui avec ce genre d'étalon est que si tout le monde a un pied, tout le monde n'a pas la même pointure. Pour rendre fiables et comparables les mesures, mais aussi faciliter les échanges, il faut assurer un minimum de constance... On a donc fini par adopter des étalons de longueur fondés sur un pied invariant, connu et reconnu par le plus grand nombre – en l'occurrence, en France, celui du roi. Le défaut majeur de ce système était que selon le pays, la région ou même l'époque, l'étalon pied n'était pas le même : le pied romain était plus court que le pied anglais, lui-même moins grand que le pied du roi français. Le problème était d'ailleurs le même avec les unités de poids et de volume, qui elles aussi reposaient sur des étalons anthropomorphiques tels que la livre ou la poignée. Avec l'essor des sciences et des échanges internationaux, le besoin d'unités plus précises et plus universelles s'est fait de plus en plus sentir tout au long du siècle des Lumières.

Du système royal à la mécanique quantique

Les révolutionnaires français, qui comptaient parmi eux de nombreux scientifiques et qui venaient de couper la tête de Louis XVI, ont donc dans la foulée aboli le pied du roi. Près de 800 unités alors en usage sur le territoire ont été remplacées par un tout nouveau système d'unités décimales : mètre, kilogramme et seconde. Celles-ci ne se référaient plus à des étalons anthropomorphiques, mais pour la première fois à des valeurs astronomiques mesurées précisément et que l'on considérait alors comme constantes, naturelles et universelles telles la durée d'un jour terrestre ou [la longueur d'un méridien](#). Depuis, le système métrique a connu de multiples évolutions et redéfinitions, mais il s'est toujours, même indirectement, reposé sur des constantes physiques. *« Un système d'unités est une construction humaine et les définitions du Système international se sont donc à l'origine appuyées sur la physique classique. Les changements successifs de définition ont découlé de la volonté d'utiliser des mesures plus stables et plus fondamentales, accompagnant ainsi les progrès de la physique »*, explique Jean-Philippe Uzan, physicien à l'Institut d'astrophysique de Paris¹. Pas étonnant dès lors que la future révision du Système international (SI) fasse la part belle aux constantes issues de la mécanique quantique et de la relativité.

Des unités nées des constantes

La redéfinition des sept unités de base (mètre, kilogramme, seconde, ampère, kelvin, mole et candela) reposera donc sur une formulation à constante explicite, c'est-à-dire une définition dans laquelle l'unité est définie indirectement en donnant une valeur exacte à une constante fondamentale reconnue. *« Nous définissons comme constante fondamentale d'une théorie physique tout paramètre dont cette théorie ne peut prédire la valeur »*, précise Jean-Philippe Uzan². Cette valeur ne peut donc être obtenue qu'empiriquement, par une mesure. Les progrès de l'instrumentation ont d'ores et déjà permis des mesures suffisamment précises pour que l'on décide d'établir conventionnellement des valeurs exactes pour certaines d'entre elles. Ainsi, après la valeur de c , la vitesse de la lumière, fixée depuis 1983, c'est au tour de h , la constante de Planck, de e , la charge électrique de l'électron, de k , la constante de Boltzmann, et de N_A , la constante d'Avogadro, d'être désormais gravées dans les tables du SI.

Sept constantes pour tout mesurer

Le futur SI sera le système d'unités selon lequel les valeurs des sept constantes physiques suivantes seront fixées exactement. Les unités hertz (Hz), joule (J), coulomb (C), lumen (lm) et watt (W) sont reliées aux unités seconde (s), mètre (m), kilogramme (kg) ampère (A), kelvin (K), mole (mol) et candela (cd) représentées ici :



C. Hein pour CNRS le Journal. Sources: projet de résolution n°1 pour la CGPM

Partager

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a ainsi fourni [une feuille de route très détaillée sur la manière dont les différentes constantes fondamentales impliquées dans le nouveau SI devraient être remesurées](#), avant de fixer leurs valeurs numériques de manière définitive. Par exemple, pour la constante de Planck, la CGPM a exigé deux méthodes indépendantes, chacune mise en œuvre dans plusieurs laboratoires de métrologie à travers le monde. La première est fondée sur une balance de Kibble (dite aussi « balance du watt »), qui permet d'équilibrer des masses avec des forces électromagnétiques. La seconde consiste à compter les atomes d'une sphère de silicium de 10 centimètres de diamètre pour définir la constante d'Avogadro, puis en déduire une valeur de la constante de Planck en utilisant d'autres constantes fondamentales connues.

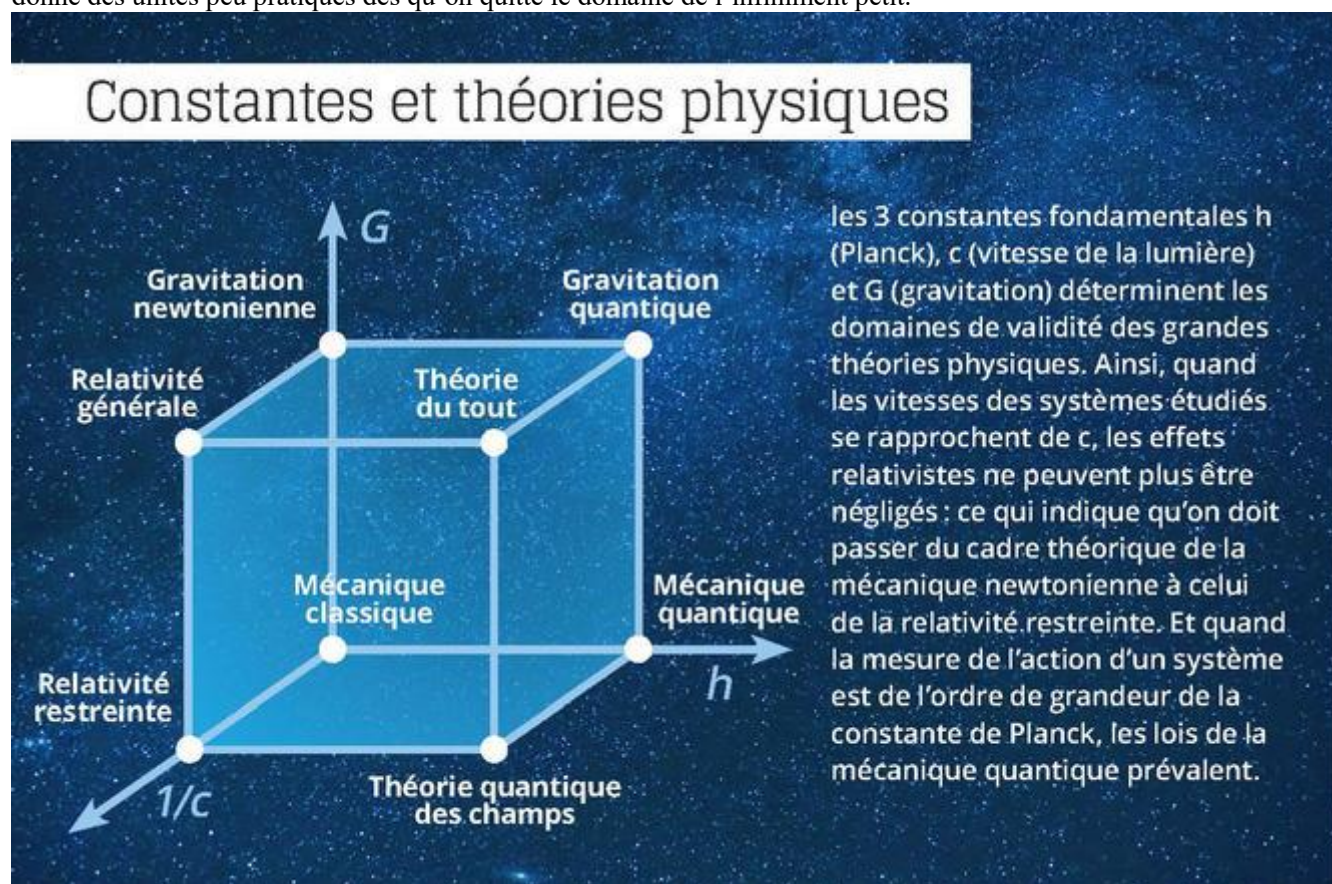
Là encore, les discussions ont été tendues. « *Les deux méthodes ne donnent pas exactement le même résultat. Du coup, certains auraient préféré retarder un peu l'échéance pour adopter le nouveau système* », relève Christian Bordé, président du Comité science et métrologie de l'Académie des sciences. Pour autant, « *les différentes mesures sont toutes dans les marges d'erreur fixées par le Comité consultatif des masses et des grandeurs associées* », précise François Nez, du Laboratoire Kastler-Brossel (LKB)³, et membre du [Comité des données pour la science et la technologie](#) (Codata). Une façon de dire qu'il faut bien finir par trancher.

Pour la petite histoire, c'est une équipe française du Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam qui a fourni la valeur de la constante de Boltzmann (k) avec l'incertitude relative la plus faible, soit $0,57 \times 10^{-6}$, inférieure d'un facteur trois à l'état de l'art antérieur. Si bien que la valeur obtenue par les physiciens français contribuera pour 55 % de la valeur de k , qui sera *in fine* gravée dans le marbre. Par ailleurs, la France contribue à la valeur de h grâce à la balance de Kibble du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) de Trappes (Yvelines), et la mesure d'autres constantes fondamentales au LKB.

Précisément, ces ajustements fins sont l'œuvre du Codata, chargé de tenir à jour la liste et la valeur des constantes fondamentales de la physique depuis 1966. « Notre travail consiste à réaliser la synthèse des différentes mesures jugées valides pour déterminer les constantes fondamentales. Leurs valeurs les plus probables sont obtenues par un ajustement de type "moindres carrés" à partir de toutes les mesures et des relations de la physique qui relient ces constantes. On garantit ainsi la cohérence de l'ensemble », explique François Nez. Cohérence que le Comité international des poids et mesures a jugée suffisante fin 2017 lors de sa 106^e session, prenant acte que les conditions fixées pour procéder à la révision du SI étaient remplies, ce qui a ouvert la voie à l'adoption du nouveau système par la CGPM prévue en novembre.

Des valeurs non calculables

« La valeur numérique de n'importe quelle constante dépend complètement du système d'unités choisi », rappelle toutefois Jean-Philippe Uzan. Par exemple, les physiciens des hautes énergies ont parfois recours aux unités de Planck, pour lesquelles les valeurs des constantes h , c et G sont par convention toutes fixées à 1, ce qui simplifie considérablement l'écriture des équations décrivant les lois physiques... mais donne des unités peu pratiques dès qu'on quitte le domaine de l'infiniment petit.



P. VAKHRUSHEV/AdobeStock.com

Partager

Le physicien et épistémologue Jean-Marc Lévy-Leblond⁴ note que « ces constantes universelles ne jouent pas seulement un rôle d'étalon dans la définition et la mesure des quantités physiques. Elles sont en outre utilisées comme normes de validité pour les théories physiques. Cet aspect se résume souvent dans des assertions telles que : "la relativité galiléenne est obtenue à partir de la relativité einsteinienne quand la constante c tend vers l'infini", ou encore : "la mécanique quantique se ramène à la mécanique classique lorsque la constante de Planck tend vers zéro". »

Les constantes « exactes » fixées par le SI ne sont en fait qu'un sous-ensemble de la trentaine que l'on retrouve dans les équations décrivant les lois physiques qui régissent notre Univers : cela va de la constante de gravitation aux masses des particules élémentaires en passant par les constantes de couplage des

différentes forces de la nature. Ne pouvant pas être calculées, ces constantes fondamentales soulignent aussi les limites de nos théories physiques. « *La plupart des physiciens sont convaincus qu'une future théorie des particules fondamentales expliquera (ou du moins devrait expliquer) la diversité de leurs masses à partir de quelques constantes d'un niveau plus profond, que ce soit les masses de constituants plus élémentaires, ou une certaine longueur caractéristique*, relève ainsi Jean-Marc Lévy-Leblond. *Quand on aura construit cette théorie, ces masses sortiront complètement du tableau des constantes fondamentales, et leur statut deviendra celui de quantités dérivées.* »

Synthétiser des concepts

Le nombre et le statut des constantes auxquelles ont recours les physiciens reflètent l'évolution des théories physiques en rendant explicite l'unité de certains phénomènes physiques. « *En établissant des ponts entre des quantités autrefois jugées incommensurables, les constantes permettent l'émergence de nouveaux concepts*, remarque Jean-Philippe Uzan. *Par exemple, c fait la synthèse entre espace et temps, la constante de Planck h permet de relier les concepts d'énergie et de fréquence et la constante gravitationnelle G crée un lien entre matière et espace-temps.* » Une unification conceptuelle qui change le statut des constantes en question et peut même aboutir à l'abandon de certaines grandeurs et unités. « *La découverte par Joule du fait que chaleur et énergie étaient deux formes d'énergie a fait que la constante de Joule, qui exprime la proportionnalité entre travail et chaleur, a perdu tout sens physique et qu'elle est devenue un simple facteur de conversion entre unités mesurant la chaleur (calories) et le travail (joule). De nos jours la calorie est devenue obsolète.* » ♦

Pour aller plus loin

« Sur mesure, les 7 unités du monde », exposition au musée des Arts et Métiers, à Paris, du 16 octobre 2018 au 5 mai 2019. Elle explore en cinq chapitres l'omniprésence de la mesure dans notre quotidien, son histoire, sa symbolique, la complexité de l'acte de mesurer à travers la profusion des instruments présentés et enfin ses applications dans de nombreux secteurs d'activités. Des vidéos invitent le visiteur à « rencontrer » chercheurs et spécialistes pour comprendre pourquoi et comment sont définies les sept unités fondamentales qui nous permettent de quantifier le monde. Conçue par le Conservatoire national des arts et métiers avec le Laboratoire national de métrologie et d'essais, et dont le CNRS est partenaire, elle vient en écho à la 26^e réunion de la Conférence générale des poids et mesures qui, du 13 au 16 novembre 2018 à Versailles, officialisera les nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole.

« Tous mesureurs, tous mesurés. La science au cœur de la société », colloque organisé par le CNRS les 18 et 19 octobre, au siège de l'organisme (3 rue Michel-Ange, 75016 Paris). Au programme : une réflexion interdisciplinaire sur le rôle et les enjeux de la mesure pour les sciences et un espace « démo » présentera aux visiteurs innovations, expériences et dispositifs autour de la mesure.

<https://mesures.sciencesconf.org>

Notes

- [1.](#)Unité CNRS/Sorbonne Université.
- [2.](#)«Varying Constants, Gravitation and Cosmology», Jean-Philippe Uzan, «Living Rev. Relativ.», 2011, 14: 2. <https://doi.org/10.12942/lrr-2011-2>
- [3.](#)Unité CNRS/ENS/UPMC/Collège de France.
- [4.](#)«Sur la nature conceptuelle des constantes physiques», J.-M. Lévy-Leblond, «Cahiers philosophiques», 2013, vol. 135 (4) : 92-112.