



## Métrieologie fondamentale : unités de base et constantes fondamentales

Ce dossier des Comptes-Rendus est destiné à faire un point sur une métrieologie fondamentale aujourd'hui en pleine mutation. Une dizaine de contributions y sont réunies sur des domaines frontières où se joue l'avenir de cette discipline. Le lecteur pourra découvrir à travers ces contributions que se dessine une tendance forte à rattacher les unités de base à des constantes fondamentales et le débat est ouvert quant à la pertinence, l'opportunité et la formulation de nouvelles définitions.

### 1. Questions sur l'avenir du Système International d'unités (SI)

L'origine du problème, qui se pose aujourd'hui au système international SI, est la révolution apportée par un ensemble de découvertes récentes et de nouvelles technologies, qui le met en décalage avec la physique moderne tant au niveau du cadre conceptuel que des techniques de mesure. Les sept unités de base sont toutes plus ou moins mises en cause :

- le mètre a déjà été redéfini à partir de la seconde et de la vitesse de la lumière ;
- le kilogramme pourrait être redéfini à relativement court terme à partir de la constante de Planck, grâce à la balance du watt, qui utilise l'équivalence entre watt électrique et watt mécanique ;
- les unités électriques ont déjà pris leur indépendance vis-à-vis du SI en retenant pour les constantes de Josephson et de Von Klitzing des valeurs conventionnelles ;
- le kelvin implique l'utilisation du point triple de l'eau alors qu'il serait bien plus satisfaisant de fixer la constante de Boltzmann ;
- la candela n'est qu'une unité dérivée de flux énergétique ;
- la mole est définie par un nombre pur, le nombre d'Avogadro, qui devrait être mieux déterminé pour permettre une alternative à la redéfinition de l'unité de masse, dans laquelle il serait fixé ;
- la seconde pourrait à plus long terme être mieux définie à partir d'une horloge optique, par exemple à hydrogène atomique, ce qui permettrait de la relier à la constante de Rydberg et peut-être un jour, à la masse de l'électron.

Cette situation est, bien sûr, la conséquence d'un accroissement considérable des connaissances scientifiques sur seulement quelques dizaines d'années alors que le temps de réaction des « institutions métrieologiques internationales » est nécessairement long. Il faudrait donc aujourd'hui restaurer la cohérence du système d'unités par une remise à plat totale de la métrieologie fondamentale.

Il existe bien un système d'unités, dites naturelles, fondé sur des *constantes fondamentales* fixées. Longtemps réservé aux physiciens théoriciens et considéré comme irréaliste dans son application, il paraît aujourd'hui revenir en force grâce aux nouvelles technologies : mesures de longueur par laser, effet Josephson, effet Hall quantique, atomes froids, interférométrie atomique, mesures de fréquences optiques, horloges optiques, ... Bien sûr il n'est pas question de fixer la valeur de ces constantes à l'unité, comme le font souvent les théoriciens, mais à des valeurs nominales compatibles avec les définitions antérieures.

On peut donc réfléchir aujourd'hui, à la proposition d'une surcouche au système SI, le rattachant plus ou moins complètement à ces constantes fondamentales, ce qui permettrait de mieux prendre en compte notre compréhension actuelle du monde physique et des interactions fondamentales en touchant le moins possible au système en vigueur.

Par ailleurs, une réforme du système d'unités ne peut se faire sans une mise en pratique de chaque définition. Les nouvelles définitions devront donc s'appuyer sur des technologies qui permettent cette mise en pratique. Ces nouvelles technologies ont aussi, le plus souvent, une version moins performante qui s'impose ou s'imposera au quotidien. Citons, par exemple, les

mesures de longueurs par interférométrie laser, les mesures de coordonnées d'espace-temps par le GPS, les mesures électriques par effets Josephson ou Hall quantique, le kilogramme électrique, ...

Dans un premier temps nous reviendrons sur le nouveau cadre théorique qu'impose la physique d'aujourd'hui à la métrologie fondamentale. Puis nous examinerons, unité par unité, quels sont les choix compatibles avec ce cadre théorique et les technologies arrivées à maturité. Cet examen nous permettra de préciser les stratégies en compétition pour l'avenir du système d'unités de base. Il est clair enfin, que tout système fondé sur des constantes de la nature, doit aussi prendre en considération la variabilité potentielle de ces constantes.

## 2. Vers un nouveau cadre conceptuel pour le système d'unités de base : chemins et schémas possibles

Ce cadre est tout naturellement celui imposé par les deux grandes théories physiques du XX<sup>ème</sup> siècle : la relativité et la mécanique quantique. Ces deux grandes théories ont elles-mêmes donné naissance à la théorie des champs, qui en incorpore tous les aspects essentiels et y ajoute ceux liés aux statistiques quantiques. La théorie quantique des champs permet le traitement unifié des interactions fondamentales et, en particulier, dans le cadre du modèle standard, celui des interactions électrofaible et forte. La Relativité Générale est, elle, une théorie classique, de sorte que la gravitation reste à part et ne réintègre le monde quantique que dans les théories récentes de cordes. Nous n'irons pas aussi loin et nous nous en tiendrons à l'électrodynamique quantique et au champ de gravitation classique. Ce cadre suffit à l'établissement d'une métrologie moderne, prenant en compte l'émergence d'une métrologie quantique. Celle-ci opère évidemment depuis longtemps au niveau atomique, par exemple dans les horloges atomiques, mais maintenant, elle fait aussi le pont entre ce monde atomique et le monde macroscopique, grâce aux phénomènes d'interférences quantiques, que ce soit pour les photons, les électrons, les paires de Cooper ou plus récemment les atomes dans les interféromètres à ondes de matière.

L'idée générale est de distinguer un cadre « cinématique » faisant intervenir les constantes fondamentales dimensionnées  $c, h, k_B$ , d'un cadre « dynamique » dans lequel les interactions sont décrites par des constantes de couplage sans dimension. Le premier cadre repose sur la Mécanique Quantique Statistique Relativiste des particules libres et le deuxième sur la théorie quantique des interactions.

### 2.1. Cadre cinématique

La première condition pour abandonner une unité au profit d'une autre est de reconnaître soit une équivalence entre les grandeurs mesurées au moyen de ces unités (exemples de l'équivalence entre chaleur et énergie mécanique, entre masse et énergie) soit une symétrie de la nature qui relie ces grandeurs lors d'une opération de symétrie (exemple d'une rotation qui transforme les coordonnées d'espace entre elles ou d'une transformation de Lorentz qui mélange les coordonnées d'espace et de temps).

Une deuxième condition est l'existence d'une technologie de mesure réaliste et à maturité. Par exemple, malgré l'équivalence entre masse et énergie on ne pourra pas définir pratiquement le kilogramme par une énergie d'annihilation, par contre, grâce à la balance du watt, on pourra le rattacher à sa longueur d'onde de Compton  $h/Mc$  par des mesures de temps et de fréquences.

Une troisième condition est liée à la confiance que l'on accorde à la compréhension et à la modélisation du phénomène utilisé pour faire le lien entre grandeurs. Par exemple, le fait que l'on puisse mesurer exactement des distances par interférométrie optique n'est jamais remis en cause parce que nous croyons tout savoir et, en tout cas, savoir tout calculer à propos de la propagation de la lumière. C'est pourquoi la redéfinition du mètre a finalement posé peu de difficultés. Par contre, la mesure des différences de potentiel par effet Josephson ou des résistances électriques par effet Hall quantique demeurent sujettes à caution car, malgré des vérifications à  $10^{-9}$  de leur reproductibilité et une bonne compréhension du caractère topologique universel derrière ces phénomènes, il subsiste toujours une incertitude dans l'esprit de certains sur la prise en compte de tous les petits effets parasites éventuels. Le fait qu'un phénomène physique mesure correctement une grandeur est directement lié à notre connaissance de toute la physique sous-jacente. Pour basculer vers une nouvelle définition il faut vaincre cette barrière psychologique et faire un acte de foi dans notre compréhension complète de l'essentiel du phénomène. Il faut donc s'assurer par un ensemble d'expériences aussi diversifiées que possible, que les résultats de mesure sont cohérents à un certain niveau d'exactitude qui sera celui de la mise en pratique et se convaincre qu'il n'y a pas à ce niveau d'effet négligé. Si toutes ces conditions sont réalisées, on pourra fixer la constante dimensionnée qui reliait les unités pour les deux grandeurs : par exemple l'équivalent mécanique de la calorie ou la vitesse de la lumière.

#### 2.1.1. La Relativité a déjà permis de fixer $c$ et de définir l'étalon de longueur

La théorie de la Relativité est le cadre conceptuel où sont reliés naturellement l'espace et le temps par les transformations de Lorentz. Elle n'a pu servir à redéfinir l'unité de longueur à partir de l'unité de temps, que parce que l'optique moderne a permis, non seulement de mesurer la vitesse de la lumière avec une incertitude relative inférieure à celle des meilleures mesures

de longueurs, mais aussi, parce que les mêmes techniques permettent aujourd’hui de réaliser la nouvelle définition du mètre de façon pratique et quotidienne. C’est la technique interférométrique qui permet de passer de la longueur nanométrique qu’est la longueur d’onde liée à une transition atomique, à une longueur macroscopique à l’échelle du mètre.

### 2.1.2. La Mécanique Quantique permet de fixer $h$ et de définir l’étalon de masse

La Mécanique Quantique nous apprend l’équivalence entre une action et la phase d’une onde. Ici encore apparaît une constante fondamentale dimensionnée : la constante de Planck  $h$ . Une action est essentiellement le produit d’une masse par un temps propre (une fois  $c$  fixé). De fait, nous savons que la Mécanique Quantique associe toujours la masse  $M$  avec la constante de Planck sous la forme  $M/h$  (que ce soit dans l’équation de Schrödinger ou les équations relativistes de Klein–Gordon et de Dirac). Nous savons aujourd’hui mesurer  $h/M_{\text{at}}$  pour un atome de masse  $M_{\text{at}}$  par interférométrie atomique avec une incertitude de l’ordre de  $10^{-8}$  grâce à une mesure de fréquence donc de temps. Malheureusement le passage à des masses macroscopiques par comptage direct ou indirect (mesure et réalisation du nombre d’Avogadro) est en butte à de réelles difficultés au niveau de  $10^{-7}$ . Ce passage au macroscopique se fait heureusement par une autre voie : celle de la balance du watt qui mesure de fait le rapport  $h/M_{\text{K}}$  pour la masse  $M_{\text{K}}$  du kilogramme étalon, également par une mesure de fréquence, grâce à la métrologie électrique quantique.

### 2.1.3. La Mécanique Statistique permet de fixer la constante de Boltzmann $k_{\text{B}}$ et de définir l’échelle des températures

La Mécanique Statistique nous permet de passer des probabilités à l’entropie grâce à une troisième constante fondamentale dimensionnée, la constante de Boltzmann  $k_{\text{B}}$ .

Actuellement, l’échelle des températures est définie par un artefact : le point triple de l’eau, certes naturel mais néanmoins très éloigné des constantes fondamentales.

Par analogie avec le cas de la constante de Planck, il paraît naturel de proposer de fixer la constante de Boltzmann  $k_{\text{B}}$ . En effet, il y a une analogie profonde entre les deux «  $S$  » de la physique, que sont l’action et l’entropie. Les variables conjuguées de l’énergie correspondantes sont le temps et l’inverse de la température avec les deux constantes fondamentales associées que sont le quantum d’action  $h$  et le quantum d’information  $k_{\text{B}}$ . Les deux concepts apparaissent unifiés comme une phase et une amplitude dans l’opérateur densité qui satisfait à la fois l’équation de Liouville–Von Neumann et l’équation de Bloch avec le même Hamiltonien. On retrouve même la combinaison du temps et de la température sous forme d’un temps complexe comme variable privilégiée de la fonction de Green thermique. Autant dire qu’on ne devrait pas fixer la constante de Planck sans aussi fixer la constante de Boltzmann sous peine d’une certaine incohérence.

Nous verrons que plusieurs méthodes de mesure de la constante de Boltzmann  $k_{\text{B}}$  sont actuellement à l’étude qui permettent d’espérer une incertitude suffisamment faible pour envisager à terme une nouvelle définition du kelvin susceptible d’entrer en compétition avec la définition actuelle.

Une fois ce cadre cinématique identifié et utilisé pour redéfinir les unités de longueur, masse et température à partir de  $c$ ,  $h$ ,  $k_{\text{B}}$ , il subsiste la liberté de choisir l’unité de temps et celle de courant électrique, l’ampère, ainsi que deux unités considérées comme moins fondamentales, la candela et la mole.

En ce qui concerne le temps, si  $c$  et  $h$  sont fixés, c’est forcément une masse de référence (ou une différence de masses) variable conjuguée du temps propre, qui peut permettre d’en fixer l’échelle. La masse de l’électron est en première ligne et donc (en dehors du positronium) le spectre de l’hydrogène, seul accès actuel à une détermination de cette masse via la constante de Rydberg et la constante de structure fine.

L’ampère est relatif à l’une des 4 interactions fondamentales et une seule, qui se trouve ainsi privilégiée sans raison par le système SI actuel. Il faut donc reconsidérer les 4 interactions simultanément avec l’éclairage de l’état actuel d’unification des forces fondamentales. C’est ce que propose le cadre dynamique qui suit.

## 2.2. Cadre dynamique

Le modèle standard de la Physique traite les interactions fondamentales comme des champs de jauge bosoniques couplés à la matière avec un jeu de constantes fondamentales sans dimension. Dans le cas de l’électromagnétisme, la constante de couplage est la constante de structure fine  $\alpha$  :

$$\alpha = e^2 / (4\pi \epsilon_0 \hbar c).$$

Ce qui veut dire que tout l’électromagnétisme devrait pouvoir être décrit au moyen de cette seule constante, sans recours à une quelconque unité de base supplémentaire ou à une autre constante fondamentale dimensionnée telle que la charge de l’électron. On peut discuter ce point de manière plus concrète au moyen de l’équation de Dirac,

$$\left( i\gamma^\mu D_\mu - \frac{m_e c}{\hbar} \right) \psi(x) = 0,$$

où l'on retrouve toutes les constantes fondamentales qui nous intéressent et où  $D_\mu$  est la dérivée covariante donnée pour l'électromagnétisme par :

$$D_\mu = \partial_\mu + i\frac{e}{\hbar}A_\mu.$$

C'est-à-dire que l'impulsion canonique est la somme de la 4-impulsion mécanique  $p_\mu$  et du terme d'interaction  $eA_\mu$ . On ne peut réécrire l'équation de Dirac sans faire apparaître la charge de l'électron, afin de réaliser le programme souhaité, que si la charge de l'électron est intégrée dans le quadri-potentiel  $A_\mu$  sous forme d'une 4-impulsion d'interaction. La charge devient un entier et la dimension « charge » (Coulomb) est systématiquement englobée dans le 4-potentiel et donc aussi dans les champs électrique et magnétique ( $eE$  et  $ecB$ ) qui deviennent homogènes à des forces mécaniques.

Pour la gravitation, la situation est particulière et l'on sait que la théorie des champs correspondante n'est pas renormalisable. De fait, seule la théorie de la gravitation en champ faible peut, à l'heure actuelle, être simplement incorporée dans le schéma précédent. Un rôle analogue à  $eA_\mu$  est alors joué par  $h_{\mu\nu}p^\nu/2$  où  $h_{\mu\nu}$  est la déviation supposée faible de la métrique d'espace-temps  $g_{\mu\nu}$  par rapport à celle de Minkowski et où le rôle de la charge est joué par  $p^\nu$  le quadrivecteur énergie-impulsion :

$$D_\mu = \partial_\mu - \frac{1}{2}h_\mu^\alpha \partial_\alpha + \frac{i}{4}\sigma^{\lambda\mu} \partial_\lambda h_{\mu\nu}$$

en dehors des effets liés au spin avec  $\sigma^{\lambda\mu} = i(\gamma^\lambda \gamma^\mu - \gamma^\mu \gamma^\lambda)/2$ .

On peut donc définir une « constante de structure fine gravitationnelle » sans dimension :

$$GE^2/\hbar c^5 \rightarrow Gm_e^2/\hbar c$$

dans laquelle l'énergie de référence  $E$  est choisie égale à l'énergie de masse de l'électron.

Une autre façon d'introduire cette analogie est de comparer les lois de Coulomb et de la gravitation :

$$qV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r} = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}\right) \left(\frac{qq'}{e^2}\right) \left(\frac{\hbar c}{r}\right),$$

$$-MV = G \frac{MM'}{r} = \left(\frac{Gm_e^2}{\hbar c}\right) \left(\frac{MM'}{m_e^2}\right) \left(\frac{\hbar c}{r}\right)$$

qui montrent bien l'analogie entre  $\alpha$  et  $Gm_e^2/\hbar c$ .

Ici se pose la question du choix de  $m_e$  plutôt que de  $m_p$  masse du proton ou de toute autre masse de particule plus ou moins élémentaire ? En fait on sait bien que la constante  $G$  de la gravitation universelle combinée avec la constante de Planck nous permet de définir un temps, le temps de Planck :

$$t_P = (\hbar G/c^5)^{1/2}$$

qui peut lui-même être comparé au temps que nous fournissent les horloges atomiques, ce qui suggère le choix précédent, qui n'est pas pour autant unique.

En conclusion de la discussion précédente, aucune unité supplémentaire n'est en principe requise pour ce cadre dynamique, il suffit de tout formuler à partir des unités mécaniques et des constantes de couplage sans dimension. L'électrodynamique quantique étant aujourd'hui incontournable à basse énergie, les seules difficultés sont dans le passage au macroscopique et donc dans la validation des effets Josephson et Hall quantique quant à leur capacité à faire intervenir les « vraies constantes fondamentales ». Ceci peut amener à conserver pour un temps des constantes effectives  $K_J$  et  $R_K$ . Les constantes  $e$  charge de l'électron et  $\mu_0$  (ou  $\epsilon_0$ ) apparaissent comme de fausses constantes fondamentales qui font seulement le lien entre unités mécaniques et le volt et l'ampère. Ramener les interactions fondamentales à des forces mécaniques revient de fait à définir des équivalences au sens défini plus haut.

### 3. Statut actuel des sept unités de base et perspectives de redéfinition à partir des constantes fondamentales

Le lien direct entre la définition d'une unité de base, sa mise en œuvre pratique et une découverte scientifique majeure est bien illustré dans le cas du mètre et de sa redéfinition à partir des progrès technologiques des sources laser. C'est l'archétype d'une démarche qui peut servir de modèle à une redéfinition des autres unités.

#### 3.1. Le mètre, unité SI de longueur et la vitesse de la lumière

Le mètre est la première unité de base pour laquelle une nouvelle définition s'est imposée à partir d'une constante fondamentale et des progrès de la physique dans la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. La mesure des longueurs par interférométrie

et la définition du mètre à partir d'une longueur d'onde étalon (auparavant fournie par la lampe à Krypton) ont définitivement basculé dans cette direction avec la découverte des lasers en 1959. C'est surtout l'apparition des méthodes de spectroscopie sous-Doppler et, en particulier, la spectroscopie d'absorption saturée en 1969, qui ont fait des lasers des sources de fréquence optique stable et reproductible. L'autre révolution a été la technique des diodes MIM qui a permis d'en faire une mesure de fréquence, directement à partir de l'horloge à césium. Partant de là, la vitesse de la lumière a pu être mesurée avec une incertitude suffisamment faible et la CGPM en a fixé la valeur, rattachant ainsi le mètre à la seconde. Ceci implique toute une procédure de mise en pratique de la définition à partir de longueurs d'ondes de lasers asservis sur des raies atomiques et moléculaires recommandées.

A l'avenir, les horloges optiques (voir le paragraphe suivant) devraient peu à peu supplanter les lasers asservis par absorption saturée de l'iode ou d'autres molécules pour délivrer une longueur d'onde contrôlée. Il est aussi possible que le mètre soit obtenu localement par asservissement de fréquence d'un laser sur une référence temporelle obtenue par transfert de temps à partir d'horloges primaires sur Terre ou dans l'espace, d'une transmission par fibres ou à partir de satellites et de peignes femtosecondes.

### 3.2. La seconde, unité SI de temps, la constante de Rydberg et la masse de l'électron

La mesure du temps est à la pointe de la métrologie : l'exactitude des horloges atomiques gagne un facteur 10 tous les dix ans (leur incertitude est meilleure que  $10^{-15}$  aujourd'hui). Grâce à ce très haut niveau d'exactitude, elle tire vers le haut les autres mesures, qui se ramènent le plus souvent à une mesure de temps ou de fréquence. Elle s'enracine dans la physique atomique la plus avancée (atomes froids) mais a aussi des applications au quotidien et en particulier à la navigation (GPS). Enfin les implications philosophiques liées à la notion de temps participent également aux motivations pour cette course en avant. Les équipes du BNM-SYRTE à l'Observatoire de Paris et du Laboratoire Kastler–Brossel ont fait œuvre de pionnier dans l'utilisation des atomes froids pour la réalisation d'horloges sous forme de fontaines atomiques. Elles ont entrepris la réalisation d'une horloge spatiale à atomes froids (PHARAO) dans le cadre d'un projet de l'Agence spatiale européenne sur la station internationale (ACES). Signalons aussi l'importance des résonateurs cryogéniques australiens pour la stabilité à court terme des futures horloges.

Parmi les révolutions récentes, citons les horloges optiques qui, associées aux peignes de fréquence fournis par les lasers femtosecondes, permettront de compter mieux et plus vite et ont de bonnes chances de supplanter les horloges micro-ondes à l'avenir. La compétition reste acharnée entre les atomes neutres (en vol libre ou confinés dans un réseau de lumière pour bénéficier de l'effet Lamb–Dicke) et les ions piégés. Finalement quel sera le rôle du spatial pour comparer les horloges et distribuer le temps ? L'exactitude des horloges sur Terre est forcément limitée dans l'avenir par la méconnaissance du potentiel de gravitation terrestre au niveau de  $10^{-17}$ . Il faudra alors disposer d'une horloge de référence en orbite. Qui seront les maîtres du temps dans l'avenir ?

Les futures redéfinitions possibles de la seconde constituent un débat ouvert. Y aura-t-il pour la seconde comme pour le mètre une définition universelle assortie d'une mise en pratique et de réalisations secondaires ? Ceci pose, comme pour le mètre, le problème de la variation possible des constantes fondamentales qui affecterait différemment les différentes transitions retenues.

Le rubidium a des avantages sur le césium, liés à ses propriétés collisionnelles et la transition hyperfine du rubidium vient d'ailleurs d'être recommandée par le CCTF (Comité consultatif pour le temps et les fréquences) comme représentation secondaire de l'unité de temps. De son côté, l'hydrogène séduit beaucoup de physiciens métrologues. Nous avons vu plus haut que la tentation est grande de recommander l'hydrogène pour définir une horloge primaire, par exemple la transition  $1s-2s$  qui a fait l'objet d'intercomparaisons spectaculaires (à  $10^{-14}$ ) avec la fontaine à césium froid ou même une combinaison appropriée de fréquences optiques permettant d'isoler au mieux la constante de Rydberg des corrections variées (ce qui se fait aujourd'hui à presque  $10^{-12}$ , grâce aux travaux des groupes de F. Biraben à Paris et de T. Haensch à Garching). Il faudrait donc pousser les calculs du spectre de l'hydrogène le plus loin possible, tout en ayant conscience de l'écart (plusieurs ordres de grandeur) qui sépare pour longtemps la théorie de l'expérience. Enfin, entre la constante de Rydberg :

$$R_{\infty} = \alpha^2 m_e c / 2h$$

et la masse  $m_e$  de l'électron, nous retrouvons la constante de structure fine, qui n'est pour l'heure connue qu'à  $10^{-8}$  près. On voit que la route est encore longue pour rattacher formellement l'unité de temps à une constante fondamentale, mais il faut prendre conscience du lien implicite qui existe déjà entre la définition de l'unité de temps et ces constantes fondamentales.

### 3.3. Le kilogramme, unité SI de masse et la constante de Planck

Tout le monde s'accorde aujourd'hui pour accepter l'idée que la masse du kilogramme étalon, invariable par définition, a en fait dérivé de plusieurs dizaines de microgrammes (c'est-à-dire quelques  $10^{-8}$  en valeur relative) et pour dire que tous les

efforts doivent être menés pour le remplacer dans son rôle de définition (recommandation de la CGPM). Plusieurs voies ont été explorées. Les deux plus sérieuses consistent en une mesure de  $h/M$  par des mesures de fréquence ou de temps. Pour la première, fondée sur l'interférométrie atomique,  $M$  est une masse atomique  $M_{\text{at}}$ . Il faut donc ensuite faire le lien avec l'échelle macroscopique : réalisation d'un objet dont le nombre d'atomes est connu et dont la masse peut être comparée à celle du kilogramme étalon (ceci revient à déterminer le nombre d'Avogadro, voir plus loin). Cette deuxième étape est pour l'instant la plus délicate et est plafonnée au niveau de  $10^{-6}$ – $10^{-7}$ . Elle a de plus l'inconvénient majeur de ne pas permettre une mise en pratique commode et universelle de la nouvelle définition.

La deuxième voie, qui semble aujourd'hui la plus prometteuse, est celle du kilogramme « électrique » pour laquelle  $M$  est directement la masse du kilogramme étalon  $M_{\text{K}}$ . Le kilogramme « électrique » est né avec la balance du watt, suggérée par Kibble en 1975, qui, en une (version BIPM) ou deux étapes, réalise la comparaison directe entre un watt mécanique, réalisé par le déplacement d'une masse dans un champ gravitationnel (celui de la Terre) ou un champ d'inertie et un watt électrique, réalisé par la combinaison des effets Josephson et Hall quantique. Cette méthode mise en œuvre il y a plus de 20 ans aux USA et en Angleterre a démontré qu'elle était capable d'atteindre un niveau d'incertitude compatible avec celui du kilogramme actuel à savoir quelques  $10^{-8}$ . Deux nouvelles réalisations sont en cours de montage et d'évaluation, l'une en Suisse, l'autre encore plus récente en France. D'autres programmes suivront très probablement. Selon toute vraisemblance cet effort débouchera dans peu d'années sur la possibilité de suivre l'évolution du kilogramme actuel et dans un deuxième temps sur la redéfinition de ce kilogramme en fixant la constante de Planck. Le kilogramme pourrait, par exemple, être défini par sa fréquence de Compton :

$$\nu_{\text{C}} = \frac{M_{\text{K}}c^2}{h}$$

telle qu'elle est mesurée par la balance du watt. Cette évolution probable est aussi la plus souhaitable sur le plan conceptuel et théorique. Nous ne pouvons que l'encourager très fortement. De plus, les futures balances ont toutes les chances d'être des versions simplifiées de la balance du watt.

### 3.4. Le kelvin, unité SI de température et la constante de Boltzmann

La mesure de la température thermodynamique requiert un instrument absolu qui est très difficile à mettre en œuvre, c'est pourquoi l'échelle internationale de température EIT90 utilise un ensemble de points fixes et des instruments d'interpolation. Un champ de recherche particulièrement actif est celui des très basses et des très hautes températures.

Ici encore la définition actuelle de l'unité, fondée sur le point triple de l'eau, pourrait évoluer si la constante de Boltzmann pouvait être déterminée avec une exactitude suffisante. Plusieurs méthodes sont en cours d'évaluation (puissance de bruit électrique, mesure d'une largeur Doppler, radiométrie du corps noir) et pourraient déboucher sur de nouvelles technologies de thermométrie absolue.

L'incertitude relative sur la valeur recommandée de la constante de Boltzmann par CODATA 1998 est  $1,7 \times 10^{-6}$ . Il faut souligner que cette valeur ne fait pas intervenir de mesure directe de  $k_{\text{B}}$ . Elle résulte seulement de la relation  $k_{\text{B}} = R/N_{\text{A}}$  où sont utilisées les valeurs recommandées pour  $R$ , constante molaire des gaz parfaits et pour  $N_{\text{A}}$ , constante d'Avogadro :  $R = 8,314472(15) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ( $1,7 \times 10^{-6}$ ) et  $N_{\text{A}} = 6,02214199(47) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  ( $7,9 \times 10^{-8}$ ).

Il existe néanmoins des mesures directes de  $k_{\text{B}}$ . Elles sont principalement de deux types :

- l'une repose sur une mesure de la tension quadratique moyenne de bruit Johnson,  $\langle U^2 \rangle$  aux bornes d'une résistance,  $R_{\text{S}}$ , en équilibre thermique à la température,  $T$ , mesurée dans une bande passante  $\Delta f$ . On a en effet :  $\langle U^2 \rangle = 4k_{\text{B}}T R_{\text{S}}\Delta f$ . Il faut noter que cette expression, qui repose sur le théorème de Nyquist, est exacte à mieux que  $10^{-6}$  près si la bande passante est inférieure à 1 MHz et si  $T < 25 \text{ K}$ . Expérimentalement, cette méthode est confrontée au délicat problème de l'évaluation précise de la bande passante de mesure, ce qui réduit l'incertitude relative de ce type d'expérience à quelques  $10^{-4}$ .
- l'autre s'appuie sur le développement du viriel de l'équation de Clausius–Mossotti et la détermination d'un de ses coefficients. Celle-ci utilise la mesure d'un changement relatif de capacitance d'un gaz d' $^4\text{He}$  entre 4,2 K et 27 K en fonction de la pression. En outre, la détermination de  $k_{\text{B}}$  à partir d'une telle mesure implique la connaissance de la polarisabilité dipolaire électrique statique de l'atome  $^4\text{He}$ . Or, la meilleure valeur déduite de cette méthode est annoncée avec une barre d'incertitude de  $1,9 \times 10^{-5}$  mais est marginalement compatible avec la valeur recommandée. Mohr et Taylor dans un article commenté sur les valeurs du CODATA estiment cette incertitude sous-estimée. De ce fait, aucune mesure directe de la constante de Boltzmann n'intervient dans la valeur recommandée du CODATA.

Il faut donc recourir à de nouvelles méthodes de détermination directe. Une méthode très prometteuse est due à Quinn et Martin et repose sur la détermination de la constante de Stefan–Boltzmann, grâce à une mesure de l'énergie totale rayonnée par un corps noir à la température du point triple de l'eau, au moyen d'un radiomètre cryogénique. Une autre méthode, encore plus

prometteuse, ramène la détermination de la constante de Boltzmann à une mesure de fréquence et a été proposée par l'auteur. Elle consiste à mesurer le plus précisément possible le profil Doppler d'une raie d'absorption (atomique ou moléculaire) d'une vapeur à l'équilibre thermodynamique. A faible pression, la forme de raie est dominée par l'effet Doppler et tend vers une Gaussienne dont la largeur de raie est donnée par  $ku$  où  $k$  est le vecteur d'onde et  $u$  la vitesse la plus probable  $\sqrt{2k_B T/M_{at}}$ . On en tirera une détermination de  $k_B/\hbar$  à partir d'une mesure de  $\hbar/M_{at}$  par interférométrie atomique.

### 3.5. L'ampère, unité SI de courant électrique et la constante de structure fine

Les unités électriques ont déjà connu deux révolutions quantiques à la fin du siècle dernier avec l'effet Josephson (EJ) et l'effet Hall quantique (EHQ). Elles sont en train d'en connaître une troisième avec l'effet tunnel à un électron (Single electron tunnelling, SET), ce qui permet d'ores et déjà de fermer le triangle métrologique (vérification de la cohérence des réalisations quantiques par application de la loi d'Ohm) au niveau de quelques  $10^{-7}$ . On s'accorde à penser que la fermeture de ce triangle au niveau de  $10^{-8}$  donnera un niveau de confiance qui fera basculer le système vers une redéfinition des unités électriques à partir des constantes fondamentales. En attendant ces unités ne sont plus rattachées au SI que par des valeurs conventionnelles des constantes  $K_J$  et  $R_K$ . Dans la pratique, la reproductibilité de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique est à un niveau tel ( $10^{-9}$ ) que les mesures électriques utilisent aujourd'hui ces effets sans autre raccordement à la définition de l'ampère. La fermeture du triangle métrologique avec cette précision, permettra de corriger éventuellement ces constantes pour les rendre cohérentes et vérifier les théories qui les relient aux constantes fondamentales de la physique.

La loi d'Ohm ne sera plus qu'une égalité entre fréquences : une différence de potentiel étant exprimée comme une fréquence Josephson, un courant comme un nombre d'électrons par seconde et les résistances électriques rapportées à la résistance de Von Klitzing seront sans dimension. Le volt, l'ampère et l'ohm deviendront des unités dérivées rattachées à l'unité de temps.

La métrologie électrique est donc en pleine révolution. Dans l'avenir, elle occupera une position clé pour tout le reste de la métrologie (voir le kilogramme « électrique »).

Nous avons aussi souligné le rôle-clé de la constante de structure fine et l'importance de sa détermination. Le condensateur calculable de Lampard associé à l'effet Hall quantique offre une première voie qui plafonne actuellement à quelques  $10^{-8}$ . L'interférométrie atomique semble une méthode plus prometteuse pour aller au-delà.

### 3.6. La mole, unité SI de quantité de matière et le nombre d'Avogadro

La mole est une quantité d'objets microscopiques définie comme un nombre conventionnel d'entités identiques (en principe matérielles mais le concept est parfois étendu à des entités non matérielles comme les photons). Ce nombre pur est pris égal au nombre d'Avogadro défini à partir de la définition actuelle du kilogramme rapporté à la masse d'un atome de carbone ( $^{12}\text{C}$ ) ce qui permet de passer de l'échelle atomique à une échelle macroscopique.<sup>1</sup> Son utilisation est commode pour établir le bilan macroscopique d'une réaction de transmutation quelconque entre entités élémentaires, mais elle n'est certainement pas essentielle dans un système d'unités de base puisque redondante avec l'existence d'une unité de masse macroscopique, le kilogramme, que d'ailleurs beaucoup d'utilisateurs lui préfèrent.

Il existe un programme international pour la détermination du nombre d'Avogadro à partir de la connaissance d'une sphère de silicium sous tous ses « angles » (caractéristiques physiques de dimension, masse, volume de la maille, composition isotopique, état de surface, etc.). Ce programme a rencontré et déjà surmonté de nombreuses difficultés et pourrait un jour réussir à obtenir une détermination du nombre d'Avogadro avec une exactitude compatible avec une redéfinition du kilogramme (cf. plus haut). Celui-ci serait alors défini, en fixant le nombre d'Avogadro, à partir de la masse d'une particule élémentaire, de préférence celle de l'électron. Ce programme, dont les chances de succès ne sont pas négligeables, pousse dans leurs retranchements nombre de technologies avancées, portant notamment sur la connaissance des propriétés d'une sphère de silicium. D'autres méthodes de réalisation d'une masse macroscopique à partir du comptage de particules individuelles (ions d'or par exemple) sont moins avancées mais néanmoins très intéressantes.

<sup>1</sup> Le nombre d'Avogadro  $\mathcal{N}_A$  est défini ici comme le nombre d'atomes, supposés isolés, au repos et dans leur état fondamental, contenus dans 0,012 kg de carbone 12. C'est donc, à un facteur numérique 0,012 près, le rapport sans dimension de la masse du kilogramme étalon à la masse de l'atome de carbone. La constante d'Avogadro  $N_A$  désigne généralement ce même nombre rapporté à une mole et elle est exprimée en  $\text{mol}^{-1}$ . Ce nombre et cette constante ne sont ni plus ni moins qu'une autre façon d'exprimer la masse de l'atome de carbone ou son douzième, qui est l'unité de masse atomique unifiée  $m_u$ . Il faut noter que, si le kilogramme est caractérisé par sa fréquence de Compton  $\nu_C$ , le nombre d'Avogadro se trouve lié à la constante de Rydberg par :

$$\mathcal{N}_A = 0.001 \frac{\alpha^2 m_e \nu_C}{2 m_u R_{\infty} c}$$

et donc que, si cette fréquence est fixée, le nombre d'Avogadro se trouvera implicitement lié au temps atomique.

### 3.7. La candela, unité SI d'intensité lumineuse et ... un nombre de photons

La candela est parfois qualifiée d'unité physiologique et, hormis une courbe fameuse de sensibilité de l'œil humain,  $V(\lambda)$ , plus ou moins universelle, elle se ramène à un flux d'énergie. On comprend mal sa survivance parmi les unités de base. Photométrie et radiométrie n'en sont pas moins des champs importants de la métrologie pour les applications industrielles et dans le domaine de l'environnement. Les radiomètres cryogéniques et les détecteurs pièges sont deux des grandes nouveautés technologiques dans ce domaine, qui permettent de faire des mesures radiométriques absolues. Mais surtout, le corps noir de référence de Quinn et Martin évoqué plus haut constitue une réalisation primaire de source radiométrique, si toutefois on se donne la constante de Boltzmann, qui intervient donc aussi ici directement. Enfin l'optique non-linéaire et, en particulier, les processus paramétriques à trois photons permettent un étalonnage absolu des détecteurs par comptage de photons corrélés et application directe des relations de Manley–Rowe.

## 4. Conclusion

Ceci complète notre tour d'horizon des sept unités de base et de leur relation aux constantes fondamentales. Il y a clairement une compétition entre deux schémas pour la définition de l'unité de masse : dans le premier de ces schémas, la constante de Planck est fixée et la balance du watt permet la mesure commode des masses ; dans le deuxième, le nombre d'Avogadro est déterminé et fixé et l'unité de masse est définie à partir d'une masse élémentaire telle que celle de l'électron, mais dans ce cas, la réalisation pratique d'une masse macroscopique passe toujours par la réalisation d'un objet macroscopique (et donc d'un artefact) dont on connaît le nombre d'entités microscopiques. Dans le premier cas, l'unité de temps est implicitement liée à la constante de Rydberg et donc à la masse de l'électron et dans le deuxième, à la constante de Planck. L'avenir nous dira lequel de ces choix est susceptible de s'imposer.

On trouvera dans ce dossier l'état de l'art sur les questions qui précèdent. Les sept unités n'y sont pas toutes traitées (il manque notamment un article sur la thermométrie et peut-être en eût-il fallu un autre sur la mesure des rayonnements : photométrie, radiométrie, ...) mais le lecteur y trouvera tout de même un panorama assez complet de la discipline à part entière qu'est la métrologie fondamentale. Il resterait à faire un point plus complet sur la variation possible des constantes fondamentales, au-delà de l'article de S. Bize et al. L'ensemble de ces questions constitue le sujet d'études d'un groupe de travail de l'Académie des Sciences.

Christian J. Bordé  
*Laboratoire de physique des lasers*  
*UMR 7538 CNRS*  
*Université Paris-Nord*  
*99, avenue J.-B. Clément*  
*93430 Villetaneuse, France*  
Adresse e-mail : [chbo@ccr.jussieu.fr](mailto:chbo@ccr.jussieu.fr) (C.J. Bordé)  
URL : <http://christian.j.borde.free.fr>