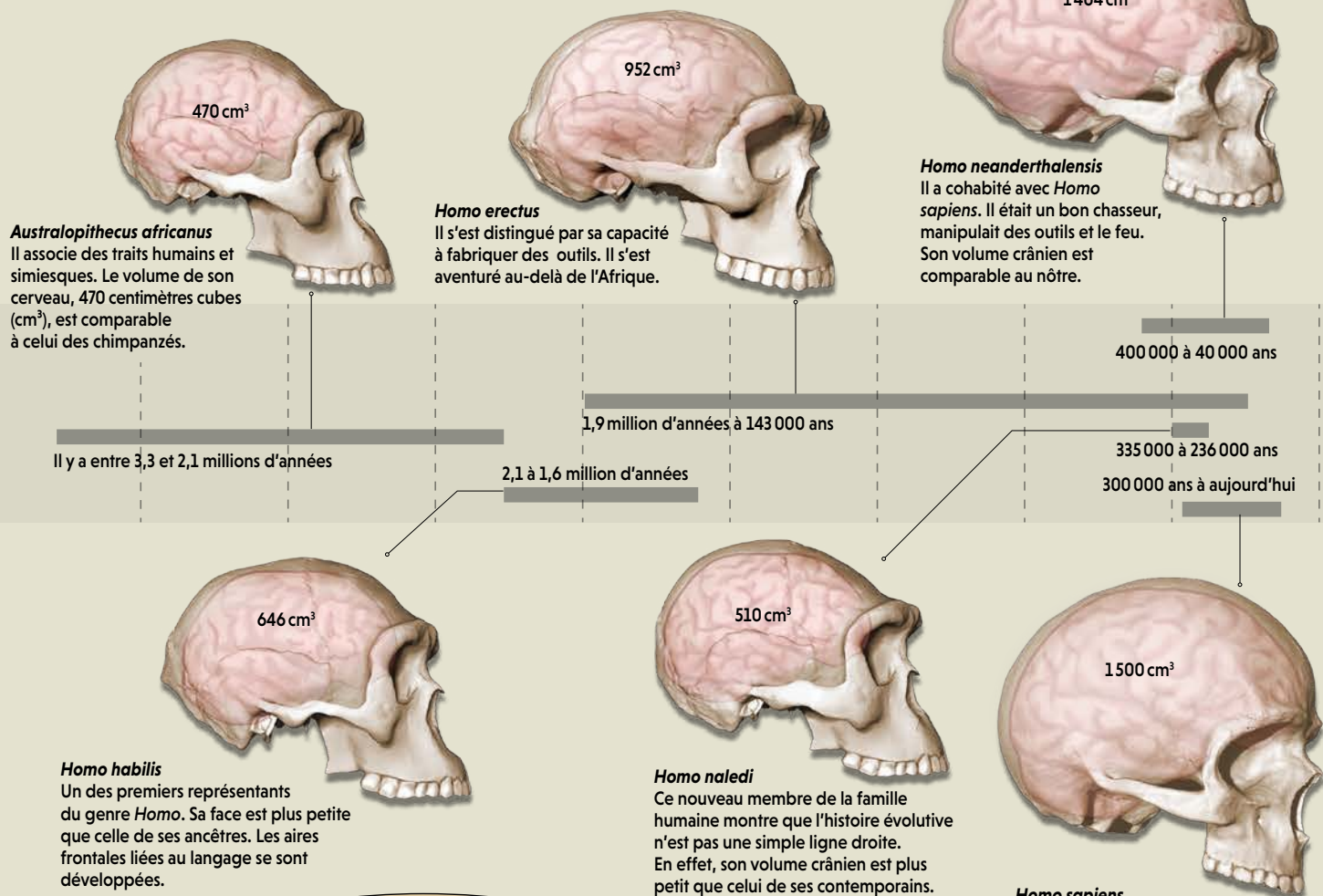


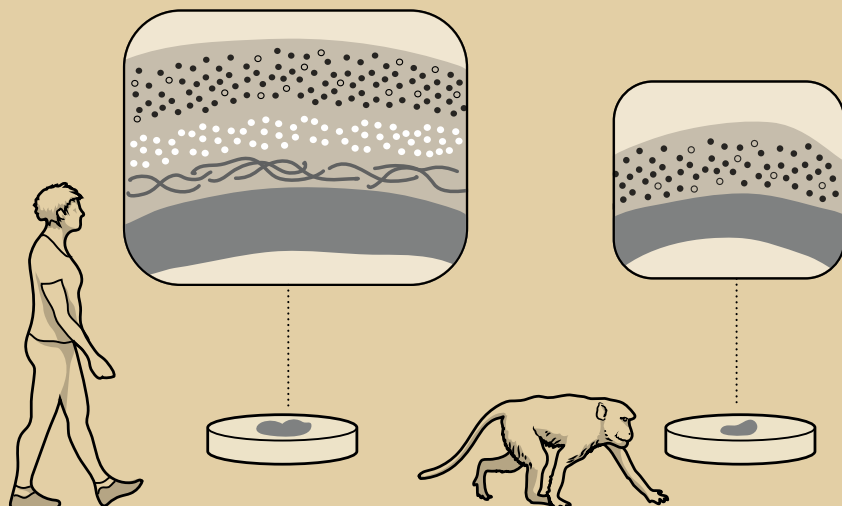
UN CERVEAU TROIS FOIS PLUS VOLUMINEUX QUE CHEZ NOS ANCÊTRES

Le dernier ancêtre commun des humains, des chimpanzés et des bonobos aurait vécu il y a entre 8 et 6 millions d'années. Après la séparation des deux lignées, de nombreuses adaptations évolutives sont apparues : la bipédie, la fabrication d'outils en pierre, une augmentation du volume du cerveau chez certaines espèces d'homininés (processus qui s'est ensuite accéléré).



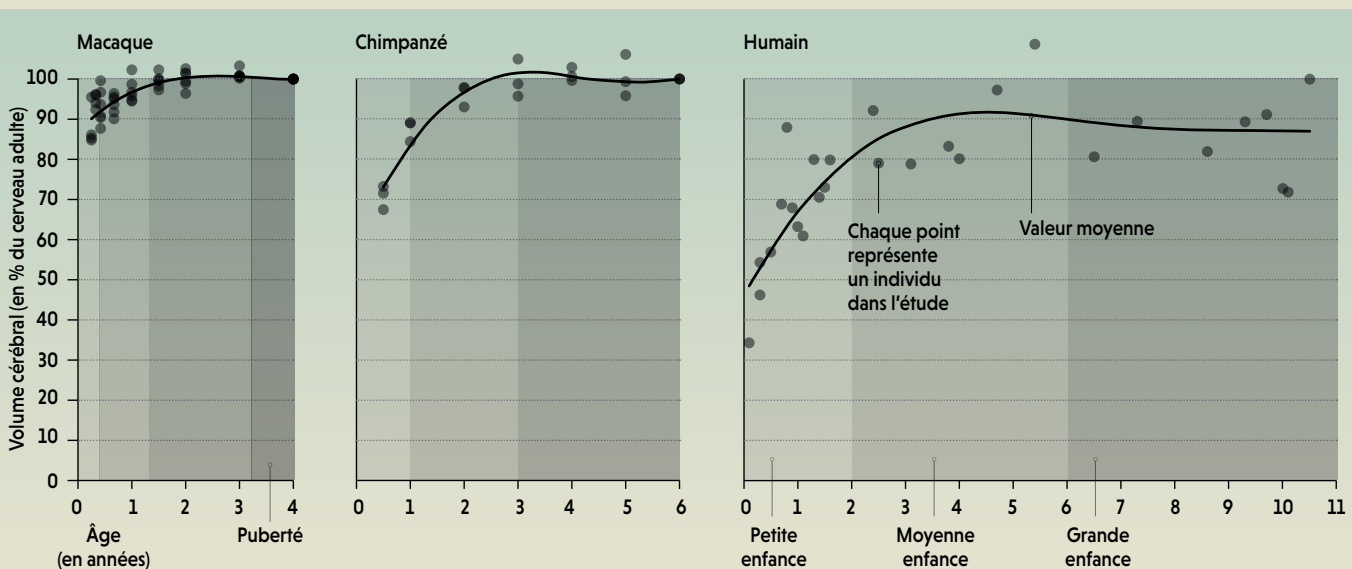
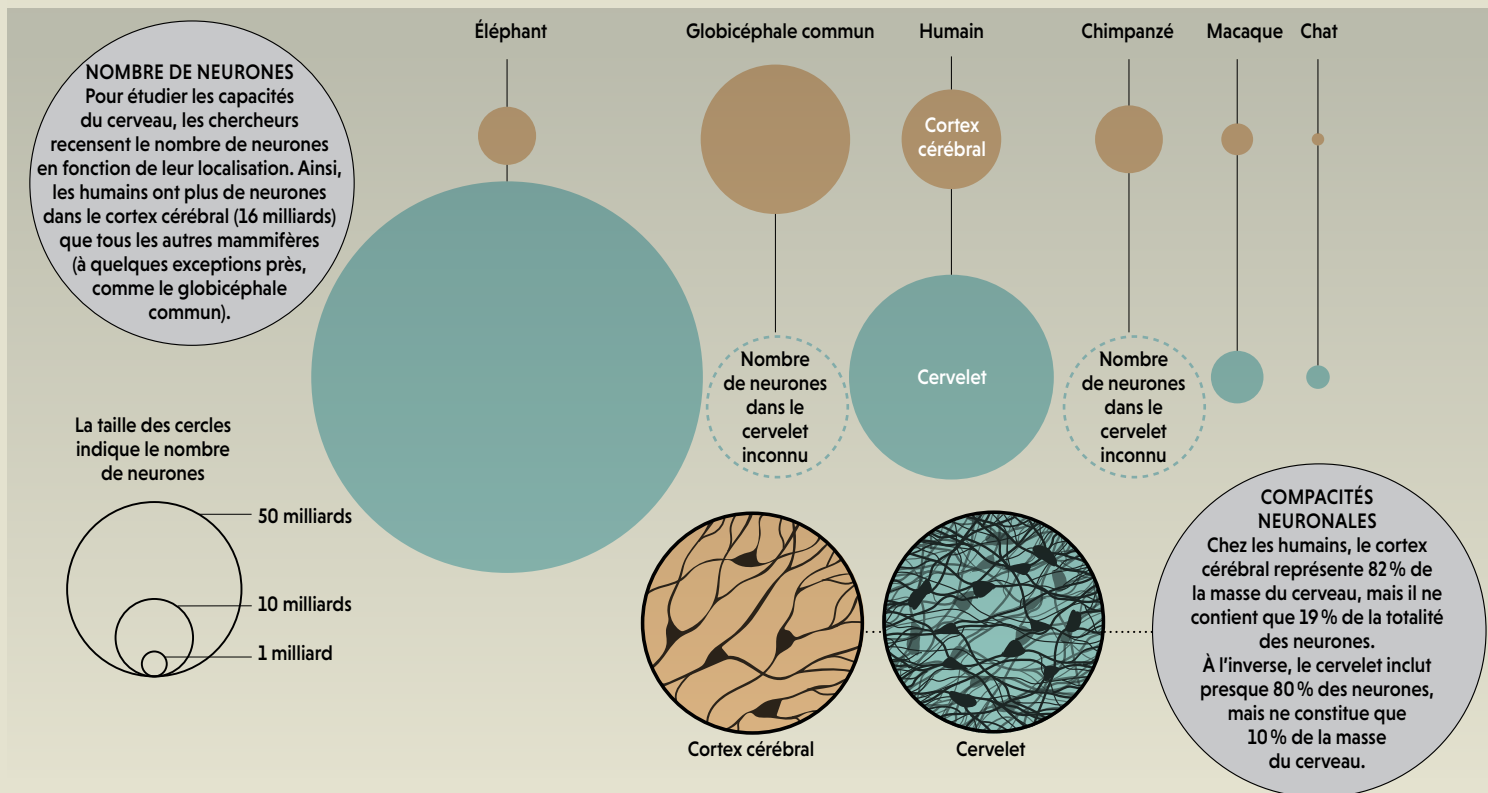
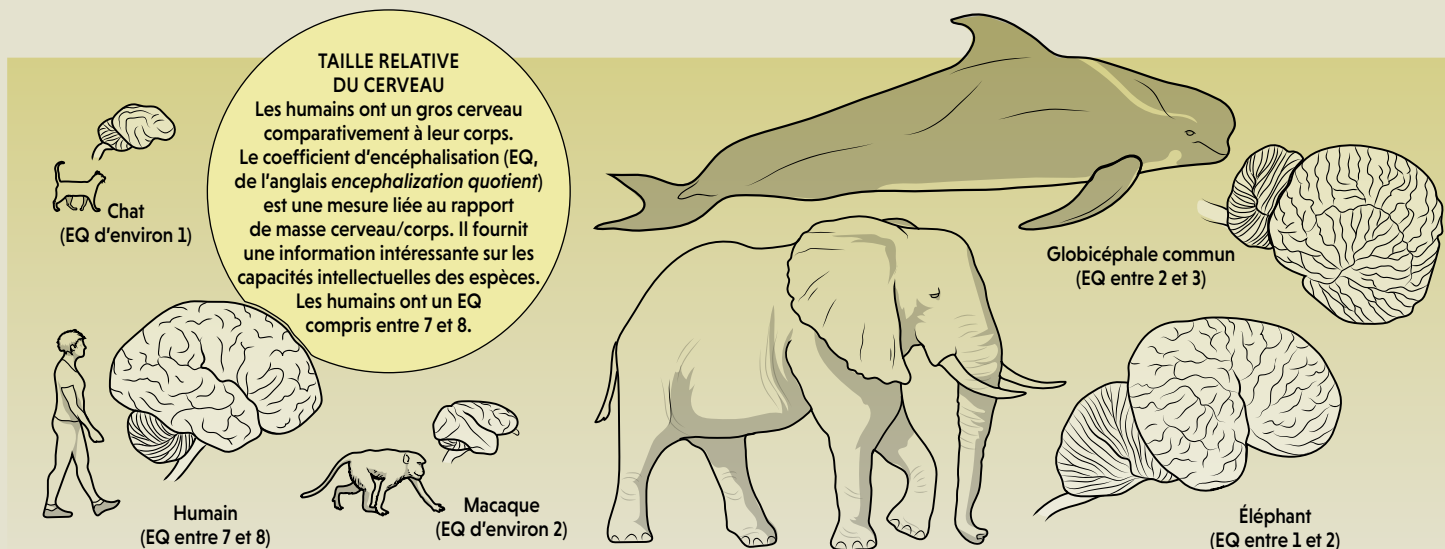
DES MINICERVEAUX EN LABORATOIRE

En 2013, Madeline Lancaster, de l'Académie autrichienne des sciences, à Vienne, et ses collègues ont fait croître *in vitro*, à partir de cellules souches, des sortes de cerveaux miniatures, nommés organoïdes cérébraux. Les cellules formaient des agrégats structurés d'au plus 4 millimètres, dont l'organisation et l'architecture rappellent celles du cortex cérébral humain aux stades précoces du développement. Ces organoïdes cérébraux offrent un outil unique pour étudier l'activité des gènes et le développement des circuits neuronaux. Des études comparées, avec ces minicerveaux humains, de primates non humains ou d'autres espèces, aideront à déterminer ce qui rend *Homo sapiens* unique.



COMMENT LE CERVEAU GRANDIT
Comparés à d'autres primates, les bébés humains ont un cerveau sous-développé. Ce dernier grandit plus vite la première année et se démarque après plusieurs années en acquérant un volume près de trois fois supérieur à celui d'un chimpanzé.

Sources : T. Sakai *et al.*, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 270, 22 février 2013 ; E. K. Boyle et B. Wood, *Evolution of Nervous Systems*, Academic Press, 2017 ; Smithsonian National Museum of Natural History (<http://humanorigins.si.edu>) ; S. Herculano-Houzel *et al.*, *Brain, Behavior and Evolution*, vol. 86(3-4), déc. 2015 ; D. Jardim-Messeder *et al.*, *Frontiers in Neuroanatomy*, vol. 11, article 118, déc. 2017 ; H. S. Mortensen *et al.*, *Frontiers in Neuroanatomy*, vol. 8, article 132, nov. 2014 ; C. E. Collins *et al.*, *PNAS*, vol. 113(3), 19 janvier 2016.



L'ESSENTIEL

> En novembre 2018, la Conférence générale des poids et mesures entérinera une vaste réforme du système international d'unités.

> Quatre unités de base, le kilogramme, le kelvin, l'ampère et la mole, seront définies à partir de constantes fondamentales de la nature dont la valeur est désormais fixée.

> Les avancées scientifiques et techniques du xx^e siècle ont rendu possible cette réforme en permettant de mesurer ces constantes avec une précision suffisante.

> Mais le principe de la redéfinition des unités est bien plus ancien...

L'AUTEURE



NADINE DE COURTENAY
philosophe des sciences,
maîtresse de conférences
à l'université Paris-Diderot,
affiliée au laboratoire
Sphere

Vers un système d'unités vraiment universel

Le SI, le Système international d'unités, a été inventé pour faciliter les échanges scientifiques et commerciaux. Sa construction, tout comme sa réforme imminente, vise à la fois à intégrer les connaissances scientifiques les plus avancées et à édifier un monde social commun.

Le «grand K» est à quelques jours de la retraite. Depuis plus de cent ans, ce petit cylindre de platine iridié, conservé au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres, est la référence mondiale du kilogramme. Mais en novembre prochain, la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) entérinera une vaste réforme du Système international d'unités. Le kilogramme, mais aussi le kelvin, l'ampère et la mole seront désormais définis à partir de constantes fondamentales de la nature, respectivement la constante de Planck, h , la constante de Boltzmann, k , la charge électrique élémentaire, e , et le nombre d'Avogadro, N_A .

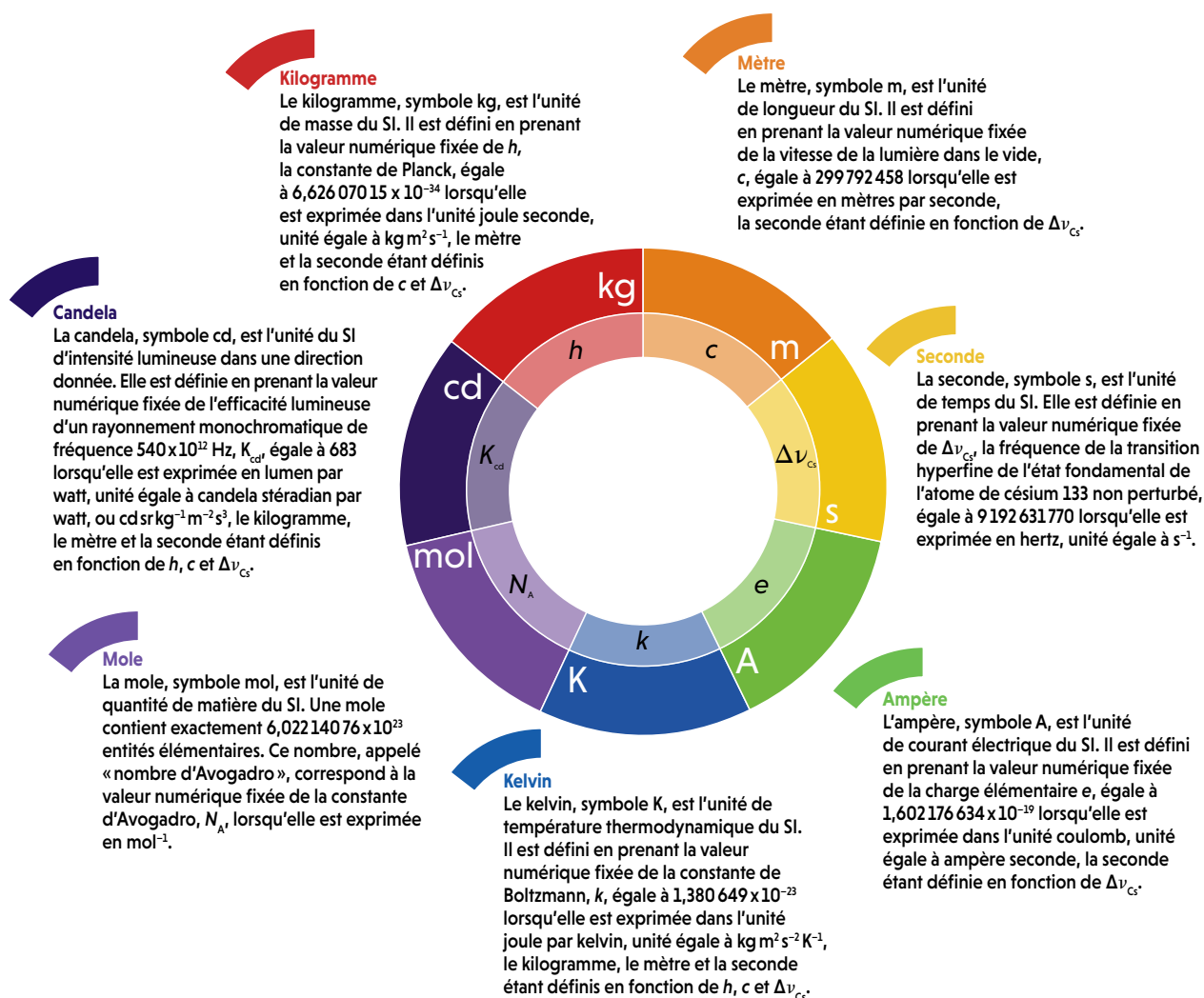
Avec cette réforme, la science fondamentale vient donc se loger au cœur de la question des unités, d'ordinaire assignée au domaine pratique, social et politique. Mais cela signifie-t-il pour autant que la théorie est en passe de gouverner le monde de la pratique? On pourrait le

croire à première vue. En effet, en faisant valoir que certaines unités de base du système international vont être redéfinies à partir de constantes fondamentales de la nature, on rattache la réforme à une entreprise de connaissance «pure» et l'on fait du nouveau système l'expression d'une nature indépendante de nous. Mais à l'inverse, on peut voir la réforme comme une conquête tout instrumentale, car après tout, sans les moyens techniques actuels, il aurait été impossible de matérialiser ces définitions par les étalons les plus stables, universels et accessibles jamais atteints. Or de telles références communes sont nécessaires aussi bien à la fabrication des produits de haute technologie qu'à une meilleure régulation des échanges internationaux.

Alors, que penser? En fait, une réflexion plus approfondie sur les unités, et tout particulièrement sur l'évolution actuelle du Système international, invite à dépasser cette tension entre théorie et pratique. En effet, les unités, >



La masse du K92, étalon conservé aux États-Unis (*ci-contre*), et celle du grand K, l'étalon actuel du kilogramme, dérivent l'une par rapport à l'autre. Il en va de même de la masse de toutes les autres copies du grand K.



> choisies dès la plus haute antiquité pour remplir les fonctions administratives et sociales liées à la régulation des échanges, ne sont pas seulement impliquées dans les aspects pratiques de la vie en société, mais aussi dans ses aspects cognitifs. Sans unités communes et stables, nous ne pourrions communiquer à autrui nos conclusions expérimentales sous forme quantitative, ni les reproduire, ni donc nous accorder sur la validation des théories ou des modèles scientifiques de manière à transformer des jugements individuels et locaux en connaissances publiques partagées. C'est dire que les unités qui, d'un point de vue strictement théorique, paraissent accessoires, constituent la pierre de touche de l'objectivité scientifique.

On le voit, la théorie et la pratique ne sont pas juste deux versants de nos activités. Elles s'articulent de façon complexe, et la dernière réforme du Système international, ainsi que toutes celles qui l'ont précédée depuis l'invention du système métrique – le premier système métrologique construit par des savants –, révèlent particulièrement bien cette complexité en montrant la profonde solidarité qui

unit le développement de la connaissance théorique à l'évolution des moyens que nous mettons en œuvre pour coordonner nos actions, construire du commun, bref, vivre ensemble en société.

UN SYSTÈME D'UNITÉS TRÈS DISPARATES

Le Système international d'unités actuel repose sur un ensemble fort hétérogène de définitions. Le kilogramme, par exemple, est défini à la manière des unités les plus anciennes de l'humanité, par la masse d'un prototype; l'unité de température thermodynamique, le kelvin, dépend quant à elle de la température du point triple de l'eau, ce point où cohabitent les trois états de l'eau (solide, liquide, vapeur), particulièrement compliqué à reproduire, car la moindre impureté le modifie; l'unité de temps, la seconde, est fondée sur une propriété d'un composant microscopique naturel immuable de l'Univers, l'atome de césium, dont il existe une myriade d'exemplaires identiques – un mode de définition que le physicien écossais James Clerk Maxwell avait suggéré dès 1870; et l'unité de

Les nouvelles définitions du Système international révisé qui seront présentées à la 26^e réunion de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), du 13 au 16 novembre 2018.

longueur, le mètre, est définie depuis 1983 à partir d'une loi de la nature et d'une constante fondamentale dont la valeur est désormais fixée, la vitesse de la lumière, c .

La réforme fut lancée en 2005 lorsqu'un groupe de métrologues appela à réviser la définition du kilogramme, qui semblait incapable de fournir une référence suffisamment stable: la comparaison de la masse du prototype avec ses copies, servant de références dans les différents pays, manifestait une variation de 50 microgrammes par siècle. Dès 2006, le groupe proposa d'étendre la révision aux unités d'intensité du courant électrique, de température et de quantité de matière en définissant toutes ces unités à partir de références constituant de véritables invariants de la nature. De fait, la réforme qui sera entérinée en novembre prochain redéfinira le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole sur le modèle du mètre, en prenant pour référence des constantes fondamentales considérées comme des invariants dans l'état actuel de nos connaissances. Ce faisant, elle rompra définitivement avec le mode de définition ancestral fondé sur l'adoption d'un artefact matériel et mettra la métrologie en harmonie avec les avancées théoriques les plus abstraites et les techniques les plus élaborées du moment.

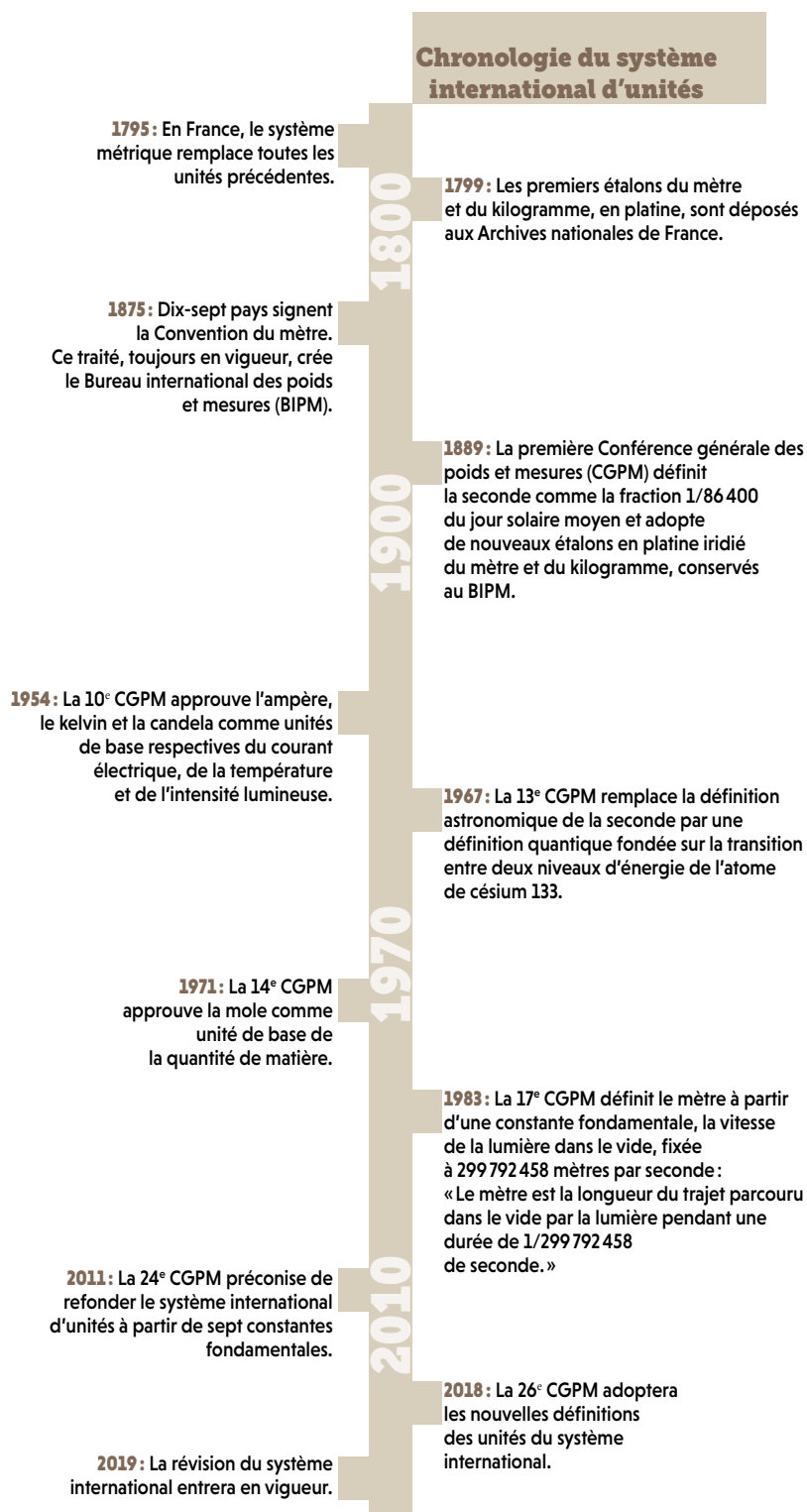
QUE SIGNIFIE FIXER UNE CONSTANTE ?

Le principe des redéfinitions proposées consiste, comme dans le cas du mètre, à fixer la valeur d'une constante fondamentale. Mais comment prétendre fixer la valeur d'une constante? Cette valeur n'est-elle pas donnée par la nature et non par nous? Comme l'explique Terry Quinn, directeur émérite du BIPM, les constantes fondamentales telles que la vitesse de la lumière ou la constante de Planck sont certes des constantes de la nature et sont donc considérées comme indépendantes de nous; cependant, lorsque nous cherchons à les connaître et à les déterminer par l'expérience en les rapportant à des grandeurs connues, c'est-à-dire des unités choisies au préalable, les valeurs obtenues dépendent bel et bien de ces unités et comportent une incertitude de mesure.

Ainsi, avant que l'on fixe c , la vitesse de la lumière, en 1983, sa valeur numérique dans le système d'unités antérieur valait 299 792 458 avec une incertitude de 1,2 lorsqu'on la mesurait en mètres par seconde, et 983 571 056,4 lorsqu'on la mesurait en pieds par seconde. Cependant, une fois ce résultat obtenu, il est possible d'inverser le processus en décidant de fixer, au sens de geler et définir comme étant exacte, la valeur de c obtenue par la mesure dans l'ancien système d'unités, en posant $c = 299 792 458$ mètres par seconde exactement, sans incertitude. Et si l'on conserve l'unité de temps de l'ancien système (qui était déjà,

depuis 1967, la seconde définie à partir d'une propriété de l'atome de césium), c'est alors la taille de l'unité de longueur, le mètre, qui se trouve assignée, puisqu'elle est de la sorte étalonnée par la valeur fixe attribuée à la vitesse de la lumière et par l'unité de temps déjà choisie.

Bien sûr, cette valeur dépend des anciennes unités, c'est-à-dire de la définition du mètre qui a servi à exprimer la valeur expérimentale de >

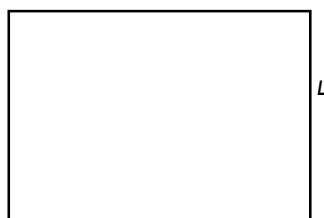


COMMENT ON CONSTRUIT UN SYSTÈME COHÉRENT D'UNITÉS

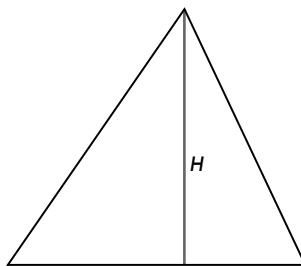
Deux voies existent pour mathématiser un domaine scientifique, l'une théorique, l'autre expérimentale. Pour articuler harmonieusement ces deux voies et bénéficier de la puissance du

calcul symbolique, l'on introduit des constantes fondamentales. Voyons (sans aucune prétention historique) comment s'opère cette articulation dans le cas de l'aire et de la longueur.

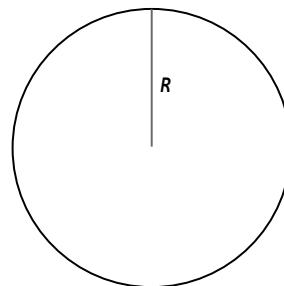
La voie théorique consiste à établir, comme on l'a fait dès l'Antiquité, des relations de proportionnalité entre les aires de certaines figures planes comme le rectangle, le triangle et le cercle, et des longueurs bien choisies de ces figures. Ces relations géométriques relient les grandeurs elles-mêmes.



$$A_{\text{rectangle}} \propto LL'$$

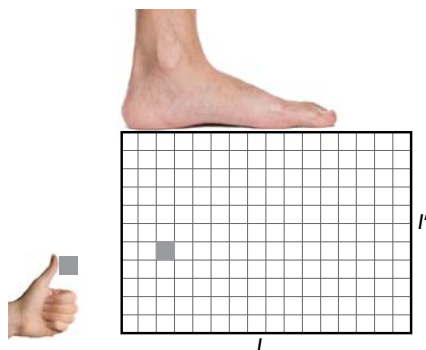


$$A_{\text{triangle}} \propto BH$$

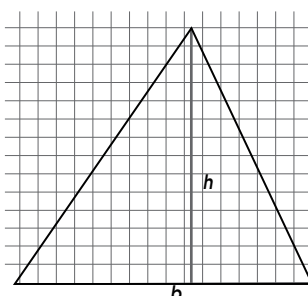


$$A_{\text{cercle}} \propto R^2$$

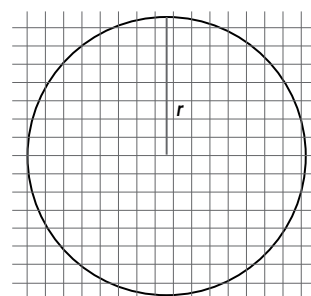
La voie expérimentale consiste à mesurer directement les aires et les longueurs en les comparant avec une grandeur de même espèce prise comme unité : les longueurs en pieds et les aires en nombre de carrés de un pouce de côté contenus dans la figure, par exemple. L'on constate alors que les mesures de l'aire et des côtés de plusieurs rectangles distincts vérifient une relation empirique où intervient une constante numérique, 144, qui est sensiblement la même pour tous les rectangles. Le même constat vaut pour les triangles et les cercles avec des constantes différentes. Les constantes numériques, déterminées à partir des mesures, dépendent des unités choisies (1 pied $\approx$ 12 pouces).



$$a_{\text{rectangle}} \approx 144 ll'$$



$$a_{\text{triangle}} \approx 72 bh = 144 bh / 2$$



$$a_{\text{cercle}} \approx 452 r^2 \approx 144 \pi r^2$$

Il est possible de synthétiser les descriptions expérimentales et théoriques sous la forme d'équations mathématiques semblables aux expressions empiriques, mais établies cette fois entre grandeurs et non plus entre mesures numériques, et ce de deux façons.

Option 1 : de façon dogmatique, on décide que les constantes numériques qui interviennent dans les expressions empiriques sont des constantes fondamentales dimensionnées. La constante $C = 144$ pouces carrés par pied carré apparaît alors comme une constante géométrique fondamentale reliant les aires de surfaces planes et les longueurs. Les équations ont ainsi l'avantage d'être indépendantes des unités choisies, car la valeur numérique de C varie en fonction des unités d'aire et de longueur de manière à laisser l'équation invariante. Elles peuvent donc être écrites entre les grandeurs elles-mêmes :

$$\begin{aligned} A_{\text{rectangle}} &= C \times LL' \\ A_{\text{triangle}} &= C \times BH / 2 \\ A_{\text{cercle}} &= C \times \pi R^2 \end{aligned}$$

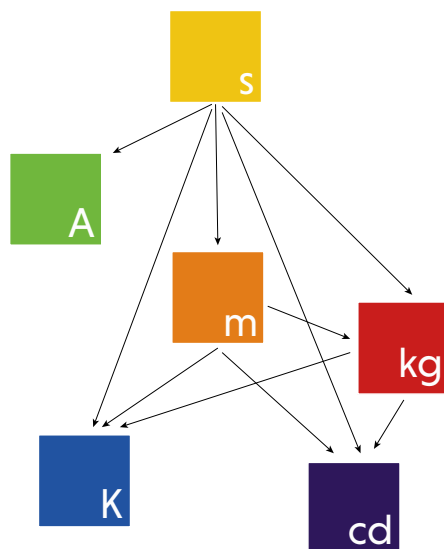
Option 2 : on fixe la valeur de la constante tirée de l'expérience à une valeur numérique (c'est-à-dire sans dimension) commode, souvent 1. On obtient alors des équations entre grandeurs où la constante C , prise égale à 1, a disparu :

$$\begin{aligned} A_{\text{rectangle}} &= LL' \\ A_{\text{triangle}} &= BH / 2 \\ A_{\text{cercle}} &= \pi R^2 \end{aligned}$$

Conséquence 1 : les aires cessent d'être considérées comme des grandeurs indépendantes reliées aux longueurs par une loi empirique : elles deviennent des grandeurs dérivées, définies à partir des longueurs par un calcul. Dès lors, la grandeur aire est déclarée conceptuellement identique à des longueurs au carré.

Conséquence 2 : le choix de la valeur de C détermine la taille de l'unité d'aire en fonction de l'unité de longueur. Ici, l'unité d'aire doit être définie par 144 carrés de un pouce de côté, soit 144 pouces carrés, soit 12² pouces carrés, soit 1 pied carré. L'on aura alors construit un système cohérent d'unités dans lequel l'équation $A_{\text{rectangle}} = LL'$ est indifféremment interprétable comme une équation entre grandeurs physiques ou une équation entre mesures de ces grandeurs, ce qui facilite le passage de la théorie à l'expérience.

Dans le nouveau système international, toutes les unités de base, hormis la mole (non représentée), dépendent de la seconde : le mètre, par exemple, dépend d'une constante fondamentale, la vitesse de la lumière, c , et de la seconde. Il en va de même pour les autres unités du système international, car toutes sont dérivées de ces unités de base : le newton est le kilogramme mètre par seconde carrée, le joule est le newton mètre, le coulomb est l'ampère seconde, etc. Le physicien allemand Carl Friedrich Gauss a amorcé la construction de ce système en rapportant une grandeur physique, la force, à un ensemble d'unités de base et non plus à une unité propre de même nature.



➤ la constante, et par là de la première définition du mètre – le quart de la dix millionième partie du méridien terrestre, mesuré dans les années 1790 par les astronomes Jean-Baptiste Delambre et Pierre Méchain. Cette dépendance est essentielle pour maintenir la continuité historique des résultats expérimentaux ; les résultats obtenus dans l'ancien système demeurent ainsi valables dans le nouveau. Le même procédé servira à redéfinir les autres unités. Ainsi, après avoir été déterminée expérimentalement dans les unités actuelles du système international, la constante de Planck sera fixée sans incertitude à la valeur $h = 6,62607015$ kilogrammes mètres carrés par seconde, et cette valeur servira à déterminer en retour, sur la base des unités existantes du mètre et de la seconde, la « taille » de l'unité de masse, c'est-à-dire la nouvelle définition du kilogramme.

Ces explications soulèvent bien des questions. Comment comprendre le rôle des constantes fondamentales dans ce processus de redéfinition ? Le geste de fixer leur valeur ne constitue-t-il qu'une convention ou comporte-t-il une signification et des conséquences épistémiques plus profondes ? Que recouvre au juste l'inversion sur laquelle repose la redéfinition ?

Déjà à la fin du XIX^e siècle, le physicien irlandais George Stoney, puis Max Planck en 1900, avaient rêvé de mettre en place un système « naturel » d'unités fondé sur des constantes fondamentales. La réforme du système international n'a toutefois vraiment pu être envisagée qu'avec l'élaboration et la maîtrise, toute récente, d'expériences permettant de mesurer les constantes fondamentales avec une exactitude satisfaisante. Mais si les développements scientifiques et techniques du XX^e siècle sont bien au cœur de la réforme, le principe de la redéfinition des unités du système international participe, quant à lui, d'un procédé très ancien

qui gouverne à la fois le regroupement des unités en systèmes d'unités reliées entre elles et un travail de reconfiguration des concepts de la physique entérinant progressivement l'évolution de nos connaissances sur le monde au cours de l'histoire. L'exemple du concept d'aire illustre la façon dont ces deux processus s'articulent (voir l'encadré page ci-contre).

Ce procédé de redéfinition des unités a commencé à se déployer avec l'ébauche du système métrique, qui visait à promouvoir, dans le sillage de la Révolution française, un système d'unités communes « à tous les temps, à tous les peuples ». C'est en effet sur le fond de l'adoption du mètre, du kilogramme et de la seconde que Joseph Fourier a pu passer, dans sa *Théorie analytique de la chaleur* (1822), des équations abstraites de la mécanique rationnelle du XVIII^e siècle, dont les expressions, dites abrégées, étaient juste des relations de proportion réduites en équations (voir l'encadré ci-contre), à de véritables équations mathématiques entre mesures, faisant intervenir des constantes physiques susceptibles d'avoir la même signification pour tous.

Aussi n'est-ce qu'à partir du XIX^e siècle que les physiciens ont pu se mettre à mesurer des « constantes physiques » – qu'il s'agisse de constantes renvoyant à la propriété d'un système physique donné, variables de l'un à l'autre comme la masse volumique de telle substance, ou de constantes universelles valables pour tous les systèmes – et que l'activité de mesure de précision a pris son essor.

LE TOUR DE FORCE DE GAUSS

La mesure de la constante de la gravitation universelle G est l'un des innombrables fruits de cette « avalanche de nombres », comme la nomme l'épistémologue canadien Ian Hacking. C'est en effet fort tardivement, au cours du XIX^e siècle, que cette constante fut explicitement dégagée. Il fallait pour cela que la deuxième loi de Newton, qui exprimait au départ une simple proportionnalité entre force et variation de la quantité de mouvement, fût tout d'abord écrite sous la forme que nous connaissons : celle de l'équation fondamentale de la dynamique $F = MA$ liant la force F appliquée, la masse M du mobile et son accélération A .

L'histoire de cette réécriture est complexe. Mais si l'on s'en tient à l'étape décisive, accomplie par Carl Friedrich Gauss au début du XIX^e siècle, l'on peut voir dans cette équation entre grandeurs l'aboutissement d'un procédé analogue à celui que nous avons décrit pour l'aire. Gauss a cessé de considérer la force comme une grandeur indépendante, mesurée relativement à une unité propre de même nature (par exemple, le kilogramme-force), pour en faire une grandeur dérivée, définie à partir de la masse et de l'accélération, et dont l'unité devint ➤

DES ÉQUATIONS SANS RÉALITÉ TANGIBLE

Au XVIII^e siècle, les lois de la mécanique rationnelle, énoncées sous forme de phrases, furent transcrites en équations. Mais la signification de ces équations demeurait fort abstraite, car il n'existait pas encore d'unités communes à tous les usagers :

« Il y a, dans la géométrie nouvelle, des expressions abrégées qui peuvent d'abord embarrasser ; par exemple celle-ci : la masse du Soleil étant supposée S , la force qu'il exerce à la distance r , sur une planète quelconque, est S/r^2 : il s'agit d'une force attractive, et on la suppose égale à une masse S divisée par le carré d'une distance ; or les forces, les masses et les distances sont des choses hétérogènes et de nature fort différente. On peut demander comment il peut y avoir égalité entre des choses si disparates. »

Jérôme Lalande, *Astronomie*, 1792

> le kilogramme mètre par seconde carrée. Ce faisant, Gauss a mis fin à plus d'un siècle de débats sur la nature de la force: en devenant une simple grandeur dérivée, la force a perdu son caractère métaphysique de cause du mouvement.

C'est à partir de cette nouvelle conception de la force et de sa mesure que l'on écrit l'équation qui exprime la loi de gravitation universelle. L'équation numérique qui lie la mesure de la force d'attraction entre deux corps – c'est-à-dire désormais la mesure de MA (en kilogrammes mètres par seconde carrée) –, la mesure des masses m et m' des deux corps en présence et celle de la distance R qui les sépare détermine un coefficient numérique de proportionnalité entre les mesures qui se trouve être le même pour tous les systèmes mécaniques. Comme dans l'exemple de l'aire, on passe de l'équation empirique entre mesures à la loi de gravitation universelle entre grandeurs, $F = G mm'/R^2$, en faisant de ce coefficient numérique une constante fondamentale dimensionnée, la constante de la gravitation universelle G , mesurée en mètres cubes par kilogramme et par seconde carrée.

Gauss, puis Wilhelm Eduard Weber et James Clerk Maxwell à sa suite, ont étendu ce processus aux grandeurs de l'électricité et du magnétisme qui constituaient jusqu'alors un domaine complètement indépendant de la mécanique. D'une part, ils ont lancé la redéfinition de l'ensemble des grandeurs physiques à partir de leurs relations empiriques avec les grandeurs mécaniques dès lors que ces relations étaient admises comme lois. Et, d'autre part, simultanément, ils ont commencé à mettre en place un système d'unités reliant en un vaste réseau les unités dérivées des grandeurs physiques aux unités de base de la mécanique. Ces dernières étaient encore, à

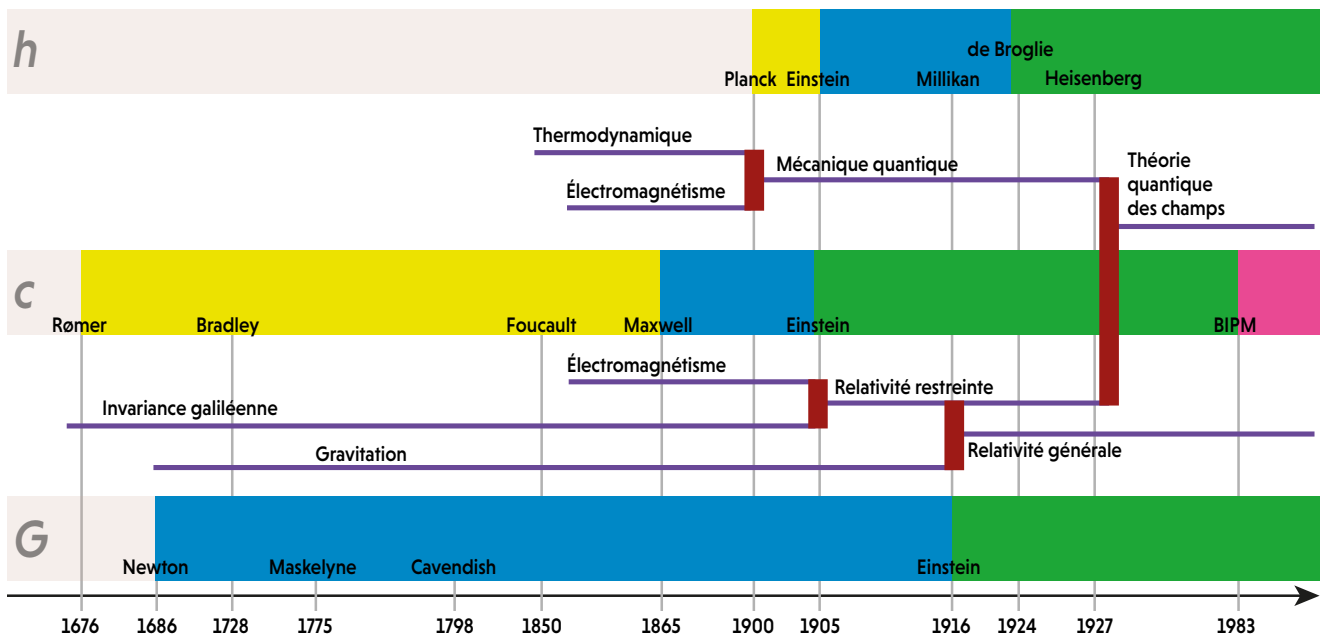
l'époque, définies de façon indépendante par un artéfact naturel ou artificiel (le méridien terrestre, puis le mètre des Archives pour la longueur, le kilogramme étalon pour la masse, la rotation de la Terre pour le temps). L'ensemble des concepts de la physique fut ainsi reconfiguré en termes «dynamiques». C'est en ce sens que l'on parle au XIX^e siècle d'une description mécanique de la nature.

LE STATUT DES CONSTANTES, TÉMOIN DE L'ÉTAT DE NOS CONNAISSANCES

Cependant, cette disposition à apparaître ou disparaître, semble-t-il à notre gré, lors du passage des relations de proportion aux équations entre mesures, puis aux équations entre grandeurs, donne aux constantes universelles un caractère passablement déconcertant. Comme le soulignait dans les années 1960 le physicien espagnol Julio Palacios dans son *Analyse dimensionnelle*, les constantes universelles apparaissent dans les lois physiques sans avoir été ni qualitativement ni quantitativement définies au préalable; elles ne désignent ni des attributs des corps, qui seraient variables de l'un à l'autre, ni des grandeurs physiques, car elles se présentent toujours avec la même valeur; et leur existence même apparaît de surcroît précaire puisqu'elles semblent dépendre du choix conventionnel de nos unités. Comment pourraient-elles représenter des propriétés invariantes caractéristiques de l'espace, de la matière ou de l'Univers?

Ces remarques cessent d'être déconcertantes si, au lieu d'envisager les constantes fondamentales dans une perspective ontologique, l'on prend acte, à la suite de Jean-Marc Lévy-Leblond, de leur évolution au cours de l'histoire. En 1977, ce physicien a proposé une

Au cours de l'histoire, les constantes fondamentales (ici la constante de Planck, h , la vitesse de la lumière, c et la constante de la gravitation universelle, G) jouent le rôle de synthétiseurs de concepts. D'abord juste des constantes spécifiques caractérisant un système physique particulier (*en jaune*), elles deviennent des constantes génériques caractérisant une classe générale de phénomènes (*en bleu*), puis des constantes universelles qui interviennent dans les lois fondamentales de la physique (*en vert*), et enfin des constantes de référence dont la valeur numérique est fixée et sert à définir une unité (*en rose*).



classification des constantes physiques qui met en exergue leur rôle épistémologique dans le développement de notre connaissance de la nature (voir la figure page ci-contre). L'itinéraire de la constante c illustre bien le destin d'une constante physique, qui est de gravir les échelons de cette classification, pour finalement être assimilée à une simple constante de conversion.



Avec la relativité restreinte, la vitesse de la lumière a atteint le stade ultime des constantes



La constante c fut tout d'abord introduite comme une constante spécifique, caractérisant l'une des propriétés d'une entité physique particulière: la lumière. Elle est devenue une constante générique lorsque les travaux de Maxwell ont montré que cette propriété caractérisait toute une classe de phénomènes: c est la vitesse dans le vide de l'ensemble des ondes électromagnétiques. Enfin, elle a acquis le statut de constante universelle avec la relativité restreinte, qui en a fait une constante caractéristique de la structure de l'espace-temps, liée à l'invariance des lois de la physique lorsque l'on passe d'un référentiel galiléen à un autre. C'est alors seulement que la constante c a pu atteindre le stade ultime de la classification: la valeur de c , jusqu'alors déterminée par l'expérience, a été fixée sans incertitude.

Comme le souligne Jean-Marc Lévy-Leblond, et comme dans l'exemple de l'aire, ce geste synthétise plusieurs concepts, ici ceux d'espace et de temps, combinés dans l'expression de l'intervalle d'espace-temps: $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta l)^2$. Les grandeurs d'espace et de temps cessent d'avoir une signification objective lorsqu'on les prend séparément; l'objectivité est attachée à leur combinaison au sein de l'intervalle d'espace-temps, seul à être invariant par changement de référentiel galiléen.

Cette synthèse se traduit par une redéfinition de l'unité de longueur: c'est à partir de la forme prise par l'intervalle d'espace-temps pour les ondes électromagnétiques, $\Delta l = c\Delta t$, que l'on a redéfini le mètre, en 1983, à l'aide de l'unité de temps et de la valeur, devenue fixe, de c . De la

même manière, la réforme imminente du système international consacra, en fixant k , la constante de Boltzmann, la synthèse des concepts de température et d'énergie. Et la constante de Planck, h , une fois fixée en conjonction avec c , entérinera un principe de la physique quantique – la dualité onde-corpuscule – selon lequel tous les objets physiques présentent à la fois des propriétés d'ondes et de corpuscules.

La valeur de c a été gelée à partir de sa valeur expérimentale, mesurée dans le système d'unités en vigueur avant la redéfinition, et non pas prise égale à un, comme dans l'exemple de l'aire, et comme le font souvent les théoriciens – un tel choix eût exigé la conversion de toutes les mesures de longueur effectuées avant la redéfinition. Les valeurs «commodes» des constantes choisies, que ce soit pour la redéfinition du mètre, ou celles, imminentes, de la masse, de la température, de l'ampère et de la mole, sont celles qui assurent la continuité avec les mesures antérieures.

PUIS LES CONSTANTES S'ÉVANOUISSENT

La constante c (et bientôt, avec elle, les constantes k et h) prend ainsi le chemin d'autres constantes qui ont aujourd'hui sombré dans l'oubli, comme la constante mécanique de la chaleur J . Initialement déterminée par l'expérience, cette constante reliait au XIX^e siècle le travail mécanique et la chaleur. Vers la fin du XIX^e siècle, elle est devenue une simple constante de conversion entre les joules et les calories (1 calorie = 4,18 joules), entérinant l'idée que la chaleur n'est qu'une forme d'énergie: ainsi reconnaît-on que deux grandeurs, initialement tenues pour être de nature différente, renvoient en fait à la même réalité physique. Une multitude de constantes fondamentales, rendues désuètes par l'unification progressive des concepts physiques, ont ainsi été enfouies et rendues invisibles dans la trame de la physique telle qu'elle se présente à nous aujourd'hui.

Mais comment s'opèrent ces reconfigurations? On pourrait croire qu'elles découlent en quelque sorte naturellement du déploiement interne de la science et sont entérinées par une sorte de *fiat*. Mais, pour peu qu'on les regarde de près, ces processus révèlent au contraire la complexité des activités pratiques mises en œuvre au cours de l'histoire pour stabiliser l'écheveau des avancées empiriques dans un corps de connaissances et d'actions communes.

La redéfinition des unités engage des opérations de nature très différente. Mesurer la valeur d'une constante dans des unités déjà établies et redéfinir l'une de ces unités après avoir fixé la valeur de la constante ne sont pas du tout des tâches symétriques. La première relève de ➤

► l'expérimentateur, la seconde du métrologue. Elles ne s'inscrivent dans aucune circularité; de fait, la valeur de la constante qui est fixée et utilisée dans la redéfinition d'une unité n'est pas une valeur obtenue par la mesure! Voyons cela de plus près.

Le travail expérimental a de multiples facettes. Certains expérimentateurs utilisent les constantes physiques sans chercher à les mesurer. Par exemple, ils testent des modèles ou des théories en comparant la valeur d'une grandeur obtenue dans le modèle testé, calculée en utilisant des constantes physiques adéquates – et en particulier des constantes fondamentales disponibles dans des tables – à la valeur de cette même grandeur mesurée dans leur expérience. D'autres, en revanche, cherchent à mesurer avec la meilleure exactitude possible certaines quantités ou constantes physiques de manière à constituer les tables de valeurs utilisées par les expérimentateurs engagés dans la validation des modèles et des théories. Il s'agit par exemple de mesurer h , la constante de Planck, avec la meilleure exactitude possible.

DE L'EXPLORATEUR AU MÉTROLOGUE

Ce type de travail relève de l'exploration, car il engage une confrontation directe à la nature. Ces expérimentateurs cherchent à ajuster leur résultat au monde sans être guidés par une attente, sans savoir ce qu'ils «devraient» obtenir. Aussi leur résultat est-il irrémédiablement affecté d'une incertitude qu'ils s'efforcent d'évaluer, mais qui reste toujours susceptible d'être entachée d'une erreur systématique inconnue. Et, de fait, des désaccords apparaissent entre les résultats des différents laboratoires qui mesurent la même grandeur ou la même constante. Mais alors, comment choisir les valeurs qui figureront dans les tables de constantes physiques?

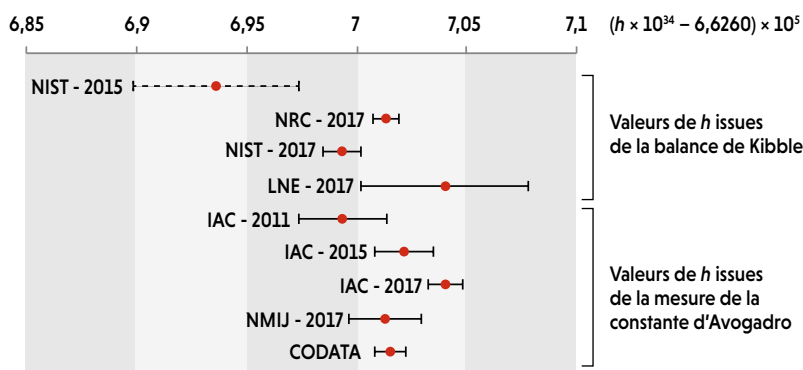
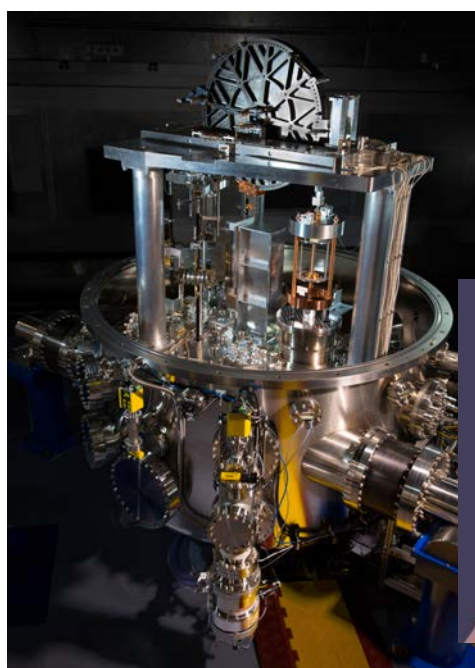
C'est simple: ces valeurs ne sont pas directement établies à partir des résultats de mesure obtenus dans les laboratoires, pas plus que celles destinées à tenir lieu de référence dans le cadre de la réforme du système international! Ces tables sont constituées par un travail métrologique qu'effectue un comité international de physiciens et de métrologues, le Committee on data for science and technology (Codata), créé en 1966. Ce comité rassemble les résultats expérimentaux «exploratoires» issus des laboratoires les plus avancés dans le monde. Ces laboratoires fournissent soit directement les valeurs des constantes cherchées, soit, plus généralement, des mesures expérimentales à partir desquelles on déduit les constantes cherchées en utilisant des relations théoriques admises.

Dans tous les cas, les valeurs des constantes physiques fondamentales peuvent être obtenues

par plusieurs voies distinctes qui mobilisent des principes de mesure et des domaines de la physique fort différents. Ainsi, certains laboratoires obtiennent leur valeur de la constante de Planck en comparant la force de pesanteur à une force électromagnétique dont la mesure est reliée à la constante de Planck – une expérience dite de la balance de Kibble. Mais d'autres déduisent leur valeur de cette même constante en évaluant le nombre d'atomes dans une sphère parfaite de silicium pur à l'aide de mesures du volume de la sphère et de la maille de sa structure cristalline. Ce nombre leur fournit une estimation du nombre d'Avogadro, dont ils déduisent une valeur de la constante de Planck à l'aide d'une équation faisant intervenir diverses autres constantes physiques comme la vitesse de la lumière et la masse de l'électron (voir la figure ci-dessous).

En général, d'une méthode à l'autre, d'un laboratoire à l'autre, les valeurs issues de ces différentes voies, accompagnées de leur incertitude de mesure, ne sont guère compatibles: l'on obtient plusieurs valeurs pour chaque constante. Le travail du Codata consiste à prendre en

Ces dernières années, plusieurs laboratoires ont fourni une valeur pour h , la constante de Planck, en utilisant soit une balance de Kibble (à gauche celle de l'Institut américain des normes et de la technologie ou NIST), soit une mesure du nombre d'Avogadro à partir d'une sphère de silicium (à droite). La valeur qui a été choisie par le Codata est un ajustement à partir des valeurs qu'il a retenues après délibération, soit toutes celles indiquées, sauf celle en pointillé (en bas).



BIBLIOGRAPHIE

T. Folger, **Vers une redéfinition du kilogramme**, *Pour la Science*, n° 473, pp. 62-69, mars 2017.

R. Davis, « **Le nouveau kilogramme sera plus pratique** », *Pour la Science*, n° 473, pp. 70-71, mars 2017.

T. J. Quinn, **From Artefacts to Atoms. The BIPM and the Search for Ultimate Measurement Standards**, Oxford university press, 2012.

J.-P. Uzan et R. Lehoucq, **Les Constantes fondamentales**, Belin, 2005.

J.-M. Lévy-Leblond, **On the conceptual nature of the physical constants**, *La Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 7(2), pp. 187-214, 1977.
En français : <https://bit.ly/2QnQd5g>

ET LA SECONDE ?

Toutes les unités du système international (hormis la mole) vont bientôt toutes découler d'une seule unité, la seconde. Mais la définition de celle-ci, fondée sur les propriétés d'un atome, reste tributaire de nos connaissances actuelles. Pour l'instant, on ne sait pas mesurer G , la constante fondamentale de la gravitation, avec une précision suffisante pour redéfinir la seconde à partir de cette constante. Mais d'autres pistes sont à l'étude...

compte ces désaccords en déterminant, sur la base des résultats expérimentaux disponibles, la meilleure estimation possible de chaque constante. Or ce travail met en œuvre une rationalité non seulement théorique, mais aussi pratique. Confrontés à des résultats expérimentaux qui ne s'accordent pas entre eux, obtenus par une pluralité d'agents humains, les membres du Codata doivent tout d'abord passer par une phase de délibération.

Cette délibération est fondée sur un examen critique de la qualité des différentes expériences et des incertitudes qui accompagnent leurs résultats. Certes, les considérations scientifiques y sont au premier plan, mais pas seulement. Le Codata doit en effet arbitrer entre plusieurs objectifs concurrents : comment traiter les discordances ? Que faire des valeurs isolées ? Faut-il opter pour le consensus et retenir toutes les valeurs, quitte à élargir l'incertitude du résultat ? Ou plutôt réduire les incertitudes et s'exposer au dissensus et à l'erreur en écartant les valeurs discordantes ? Le conflit ne peut être tranché par la seule raison théorique, car il appelle à établir une hiérarchie entre des valeurs humaines. La délibération comporte donc nécessairement des aspects subjectifs et politiques. C'est seulement à l'issue de cette étape délibérative que commence la phase d'estimation calculatoire, où l'on déduit des résultats expérimentaux retenus la valeur de la constante, en appliquant une méthode d'ajustement de type méthode des moindres carrés.

Dans ce travail d'ajustement, l'objectif des métrologues du Codata est à l'opposé de celui des expérimentateurs qui testent les théories et des explorateurs : lorsqu'ils testent des théories, les expérimentateurs s'efforcent d'ajuster celles-ci au monde pour le décrire. Les explorateurs cherchent eux aussi à ajuster leurs valeurs au monde dans un but descriptif. Tandis que les métrologues imposent à des constantes de satisfaire les relations que dictent les théories admises, et ajustent ainsi au contraire les valeurs numériques des constantes aux théories existantes. L'objectif des métrologues du Codata est non pas de décrire la réalité, mais de fournir à tous les agents de par le monde des repères communs visant à régler leurs activités de manière à ce que les expériences, les actions et les décisions qu'ils sont susceptibles d'élaborer de façon indépendante s'accordent et soient compatibles. Par là, ils s'assurent en même temps de la cohérence de nos théories entre elles. Ainsi, l'ajustement mis en œuvre dans le processus d'estimation revêt-il une fonction pratique de coordination, et non pas une fonction descriptive attachée au monde tel qu'il est.

Cependant, la table des valeurs « recommandées » des constantes fondamentales est provisoire : le Codata la révisé tous les quatre

ans afin de tenir compte des avancées théoriques et expérimentales. Il en ira tout autrement pour les valeurs des constantes h , k , e et N_A dont le Codata a annoncé les valeurs lors d'une séance extraordinaire en septembre 2017 : ces valeurs sont désormais fixées, sans incertitude, et serviront, après la ratification définitive de la réforme lors de la Conférence générale des poids et mesures, du 13 au 16 novembre 2018, à redéfinir les unités de masse, de température, de courant électrique et de quantité de matière.

Le travail d'ajustement se prolonge ainsi par un travail normatif, un acte législatif qui participe de l'édiction d'une norme. Là encore, la démarche est opposée à celle des expérimentateurs qui testent les théories : ici, le monde est appelé à s'ajuster aux normes – non pas certes le monde réel muet, indépendant de nous, mais le monde conceptualisé, mis en forme, dans lequel se déploie l'action humaine, résultat d'un travail tout à la fois normatif, expérimental et institutionnel ; le monde social et technique construit par nous et dans lequel nous pouvons organiser et coordonner nos actions.

DEUX VISIONS, DEUX MONDES

Finalement, la réforme du système international articule deux directions d'ajustement, l'une théorique, l'autre pratique, dont la conjugaison éclaire le processus de développement de nos connaissances. D'un côté, les expérimentateurs explorateurs cherchent à s'ajuster au monde. Ils font des erreurs systématiques inassignables puisque nous sommes tous dans l'ignorance du monde réel. De l'autre, les métrologues transforment, par un travail spécifique, les tentatives de description des explorateurs en directives auxquelles devra se conformer le monde technique et social humain afin que les usagers puissent y coordonner leurs actions.

Les deux types d'ajustement ne sont pas étanches. D'un côté, l'explorateur se laisse inévitablement guider par les résultats des autres, et pas seulement par le monde réel. Ses nouveaux résultats de mesure ont ainsi tendance à se rapprocher de ceux déjà obtenus du simple fait qu'il a connaissance des résultats antérieurs. Cet effet nuit à la recherche des erreurs systématiques inconnues en masquant les désaccords qui auraient pu surgir entre les résultats. D'un autre côté, les actions des usagers, toutes charpentées qu'elles soient par l'infrastructure du monde humain construit, sont néanmoins bel et bien plongées dans le monde réel et sont toujours susceptibles de mettre au jour un écart irréductible au monde tenu pour vrai.

C'est ainsi que du nouveau, de l'inédit, peut jaillir, telle une étincelle, du frottement entre les deux mondes, jamais parfaitement ajustés l'un à l'autre. ■

L'ESSENTIEL

> Pour l'heure, l'empreinte écologique des voitures électriques est presque aussi négative que celle des voitures à moteur thermique.

> De grandes quantités de gaz à effet de serre sont émises lors de la fabrication des batteries des véhicules électriques. De plus, la production de l'électricité

nécessaire à la recharge des batteries est souvent associée à d'importantes émissions, notamment en Allemagne.

> Le bilan ne s'améliorera que lorsqu'on produira davantage d'électricité « propre ».

> D'autres formes de pollution que les gaz à effet de serre sont aussi à prendre en compte.

L'AUTEUR



CHRISTOPHER
SCHRADER
journaliste
scientifique
à Hambourg,
en Allemagne

Les voitures électriques sont-elles écologiques?

On présente l'adoption des voitures électriques comme une étape décisive de la transition énergétique. Mais un long chemin reste à parcourir avant que ces véhicules soient vraiment moins polluants que les voitures classiques. Le cas allemand, notamment, l'illustre.

