

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.

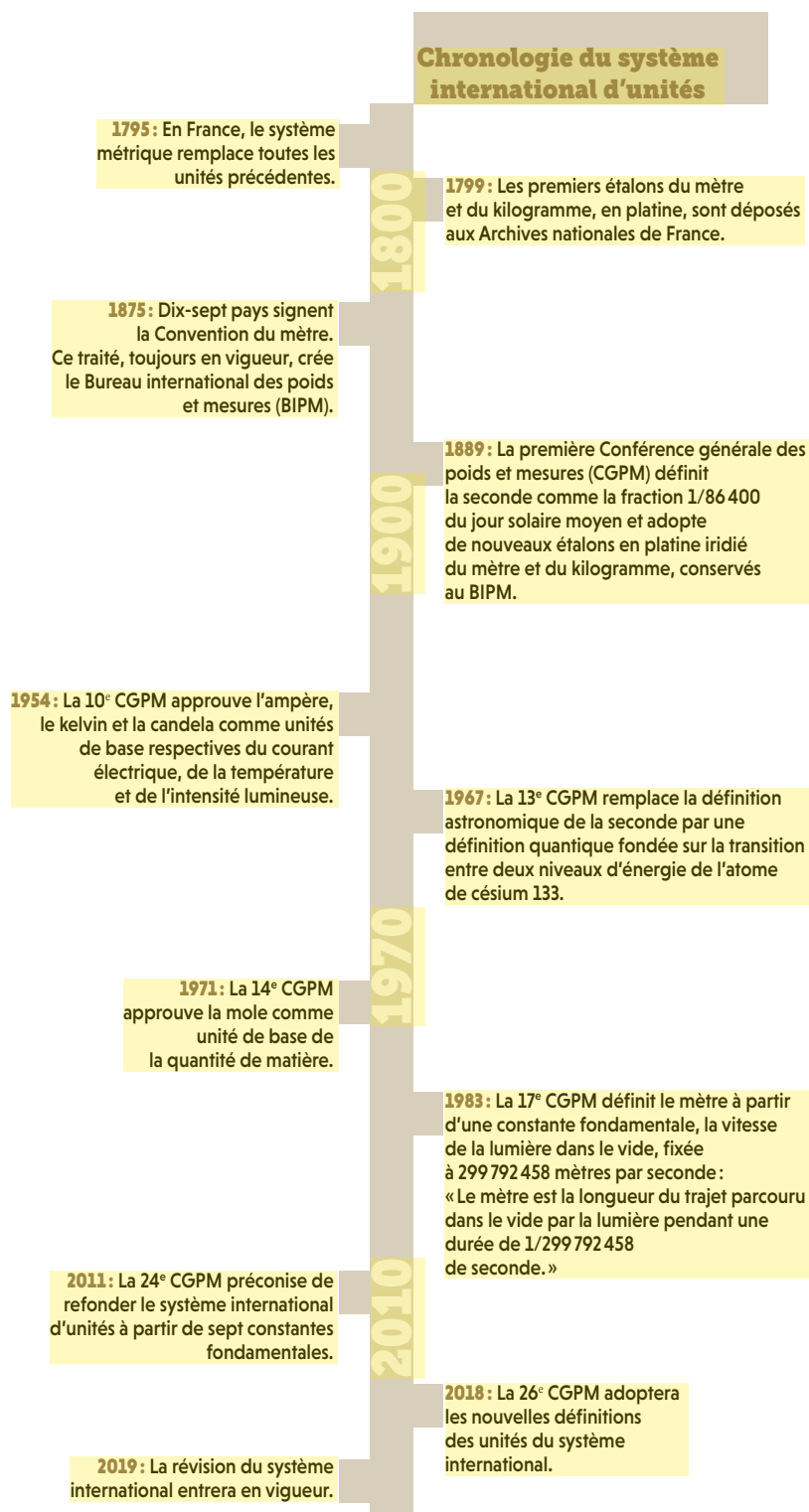
QUE SIGNIFIE FIXER UNE CONSTANTE ?

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 >

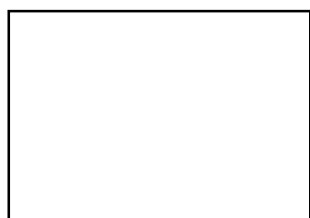


COMMENT ON CONSTRUIT UN SYSTÈME COHÉRENT D'UNITÉS

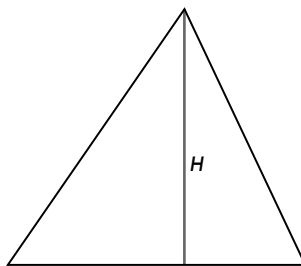
Deux voies existent pour mathématiser un domaine scientifique, l'une théorique, l'autre expérimentale. Pour articuler harmonieusement ces deux voies et bénéficier de la puissance du

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.

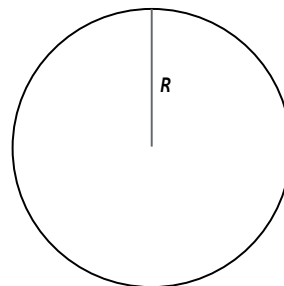
La voie théorique consiste à établir, comme on l'a fait dès l'Antiquité, des relations de proportionnalité entre les aires de certaines figures planes comme le rectangle, le triangle et le cercle, et des longueurs bien choisies de ces figures. Ces relations géométriques relient les grandeurs elles-mêmes.



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

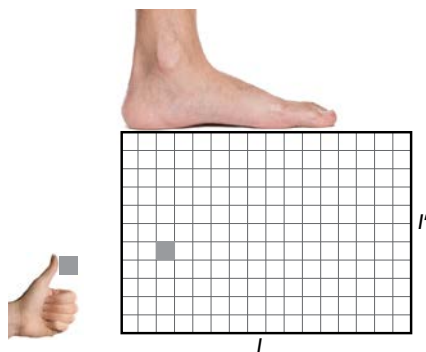


$$A_{\text{triangle}} \propto BH$$

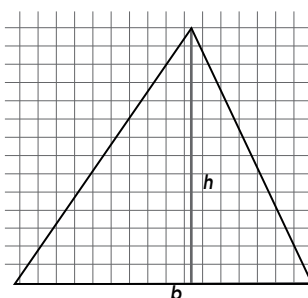


$$A_{\text{cercle}} \propto R^2$$

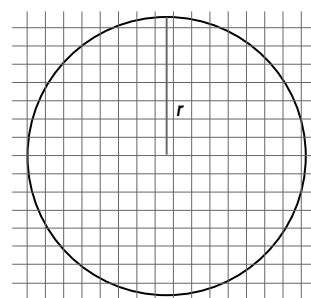
La voie expérimentale consiste à mesurer directement les aires et les longueurs en les comparant avec une grandeur de même espèce prise comme unité : les longueurs en pieds et les aires en nombre de carrés de un pouce de côté contenus dans la figure, par exemple. L'on constate alors que les mesures de 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.