

# Construction d'une balance du watt en bois

Gymnase Français de Bienne

Lysiane André

[lysiane.caroline@gmail.com](mailto:lysiane.caroline@gmail.com)

## 1. Introduction

« Un des plaisirs que procure le fait d'être un chercheur en métrologie est que cela nous emmène au premier plan de la science. » (Prof. A.J. Wallard, directeur honoraire du BIPM)

La métrologie, ou la science de la mesure, est une discipline importante mais peu connue. Pourtant, elle se situe au premier plan de la recherche scientifique, de l'activité économique et des besoins des consommateurs. Elle nous concerne aussi particulièrement car la Suisse fait partie de l'un des quatre pays du monde possédant une balance du watt, utilisée pour redéfinir le kilogramme. La redéfinition de cette unité de masse a été ces dernières années le plus grand projet mondial en métrologie, dont l'enjeu était de remplacer l'ancienne définition basée sur le kilogramme étalon exposé à Paris par une définition basée sur une constante physique. Cette décision a été votée le 16 novembre 2018 à Paris par la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) qui a approuvé la révision du Système international d'unités (SI), et ainsi accepté la redéfinition du kilogramme, mais aussi de la mole, du kelvin et de l'ampère. Le SI révisé entrera en vigueur le 20 mai 2019.

J'ai eu le privilège de me pencher sur ce thème de la physique – plus précisément la balance du watt – à l'occasion de mon travail de maturité de dernière année de gymnase. Pour ce travail, je me suis inspirée de la balance en bois qu'a construite Grady Hillhouse (<https://www.youtube.com/watch?v=EASG8j44M3M&t=3s>), elle-même basée sur la balance en LEGO conçue par les scientifiques du NIST, l'institut de recherches en métrologie aux Etats-Unis où se trouve également une balance du watt ([https://www.youtube.com/watch?v=oST\\_krdqLPQ](https://www.youtube.com/watch?v=oST_krdqLPQ)).

## 2. Histoire du kilogramme

Proposé par l'Académie des Sciences, le premier système de mesure est apparu en 1793 lors de la Révolution française. Le mètre, la seconde ou le kilogramme sont toutes des unités nées cette année-là. L'unité de masse, le kilogramme, est définie alors comme étant la masse d'un décimètre cube d'eau pure à 4°C. En 1889, les prototypes internationaux du mètre et du kilogramme – ou « étalons » – sont acceptés par la CGPM et exposés à Paris. « Ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse », déclare la CGPM à propos du kilogramme étalon, surnommé Grand K, ce qui signifie qu'un kilogramme est dorénavant absolument égal à la masse du Grand K.

Mais ces définitions sont imprécises, car elles reposent sur des objets matériels ou sur des mesures inexactes. Les métrologues ont donc cherché des méthodes pour faire reposer ces unités sur des constantes physiques, qui sont plus précises et surtout universelles. Depuis 1983, la définition du mètre repose sur la vitesse de la lumière dans le vide, mais la définition du kilogramme doit attendre jusqu'en mai 2019 pour être basée sur une constante physique, la constante de Planck. Pour cette dernière redéfinition, deux techniques différentes dont la mise en œuvre requiert une précision très élevée ont été retenues : la sphère de silicium et la balance du watt.

- Sphère de silicium

La première méthode consiste en une sphère d'un kilogramme presque parfaitement ronde composée de silicium 28. Le diamètre de la sphère est mesurable précisément, et par lui le volume total de la sphère. On lie masse et volume en fixant le kilogramme comme étant la masse d'une sphère d'un certain rayon.

- Balance du watt

La seconde méthode est une balance conçue en 1975 par Bryan Kibble, qui eut l'idée de comparer une puissance mécanique à une puissance électrique, et ce via deux phases bien distinctes : les phases statique et dynamique. Le watt est l'unité de la puissance, d'où le nom de la balance (qui est d'ailleurs aujourd'hui officiellement appelée Balance de Kibble en mémoire de son inventeur). Le principe de cette expérience est simple, mais sa réalisation demande beaucoup de travail. Les métrologues y ont travaillé à plein temps et durant de longues années afin d'obtenir la plus haute précision possible pour tous les différents paramètres de la balance.

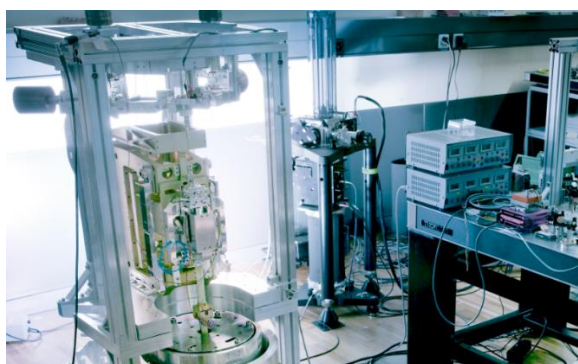


Figure 1 – Balance du watt à METAS.  
Source : [www.metas.ch](http://www.metas.ch)

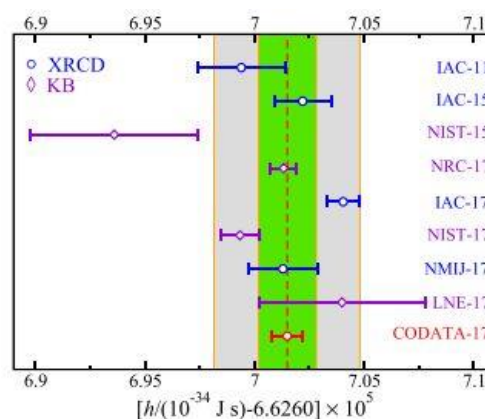


Figure 2 – Valeurs de la constante de Planck obtenues à l'aide de la sphère de silicium (en bleu) et de la balance du watt (en violet).  
Source : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/aa950a>

Elle est basée sur deux principes quantiques liés à la constante de Planck  $h$  : les effets Josephson et Hall quantique. Cette constante, qui joue un rôle capital pour la redéfinition du kilogramme, a été définie grâce à la sphère de silicium et à la balance du watt avec une mesure d'incertitude de l'ordre de  $10^{-8}$  en 2017, ce qui est suffisant pour la redéfinition du kilogramme. Mais le 20 mai 2019, lors de l'entrée en vigueur du nouveau SI, elle sera rendue fixe et n'aura donc plus d'incertitude. Les scientifiques travaillant sur la balance du watt dans divers pays – principalement USA, Canada, France, Suisse – et ceux travaillant sur la sphère de silicium – principalement Allemagne, Italie et Japon – ont pris les mesures nécessaires pour calculer la constante de Planck. En Suisse, les recherches se font à l'Institut fédéral de métrologie METAS. Dans le cas de la balance du watt,  $h$  est mesurée à partir des copies du Grand K. On devait donc partir du kilogramme pour définir la constante. Cette mesure a exigé beaucoup de minutie, et les scientifiques se sont finalement mis d'accord à fin 2017 pour lui donner la valeur de  $6,626\,070\,150 \cdot 10^{-34}$  Js (figure 2).

Lorsque le nouveau SI entrera en vigueur le 20 mai 2019, le Grand K ne sera plus la référence absolue. C'est la constante de Planck, une constante de la nature, qui sera absolue et qui servira dorénavant à définir le kilogramme. C'est la même démarche qui a été appliquée en 1983 à l'unité du mètre, la vitesse de la lumière ayant été définie avec une valeur fixe sans incertitude. L'analogie suivante peut aider à comprendre les similitudes entre les unités du mètre et du kilogramme :

	<b>Kilogramme</b>	<b>Mètre</b>
<b>Ancienne définition</b>	Kilogramme étalon	Mètre étalon
<b>Outil de redéfinition</b>	Balance du watt, sphère de silicium	Laser
<b>Constante physique</b>	Constante de Planck	Vitesse de la lumière

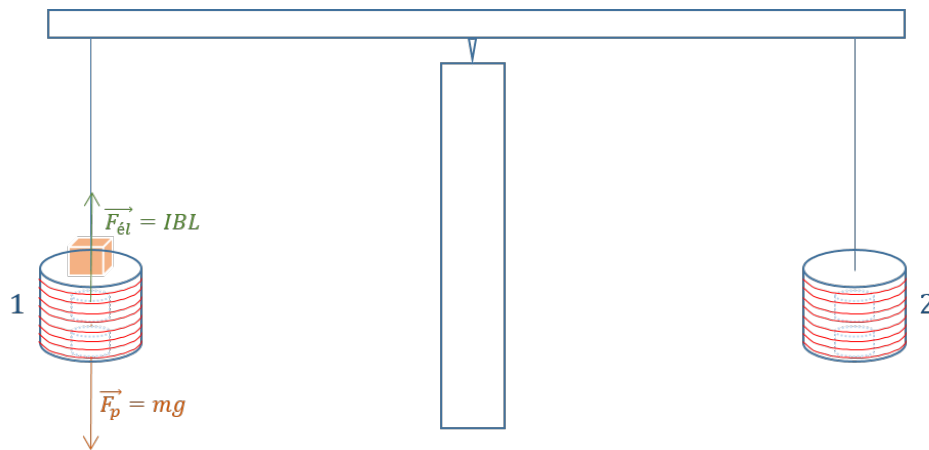
### 3. Fonctionnement de la balance du watt

La balance du watt ressemble à une balance normale à deux fléaux. Un pilier central fixé sur le socle soutient le balancier, troué en son centre par un pivot aux angles bien aiguisés qui repose sur une petite plaque de verre. À chaque extrémité du balancier est suspendue une bobine enroulée de fil de cuivre. Ces bobines sont creuses et ne touchent pas le socle de la balance. Les bobines se déplacent verticalement autour de deux aimants en répulsion fixés sur une vis posée sur le socle, formant un champ magnétique principalement horizontal.

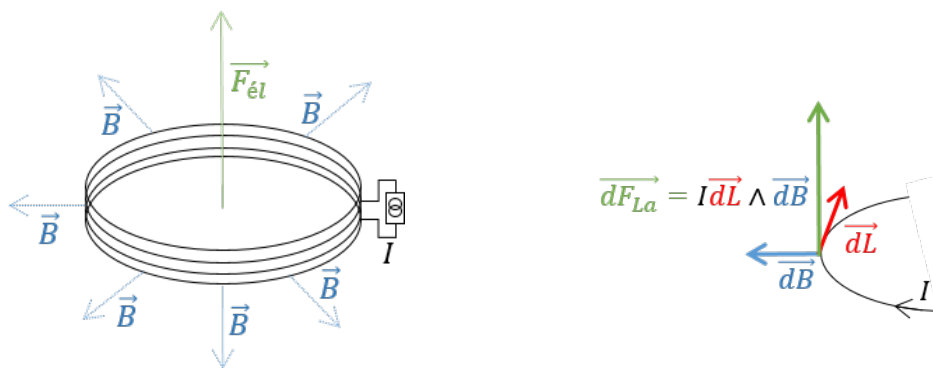
L'expérience se déroule en deux phases, complètement indépendantes l'une de l'autre : les phases statique et dynamique.

- Phase statique

Durant la phase statique, on pose une masse d'un côté de la balance, ce qui engendre une force de pesanteur déséquilibrant la balance. Pour compenser cette force, dans le cas d'une balance normale, on mettrait un poids identique et si possible étalonné sur l'autre plateau pour que la balance soit en équilibre, pour ensuite comparer les deux poids et connaître la masse souhaitée. Mais ici, on compense la force de pesanteur  $F_p$  par une autre force : la force électromagnétique  $F_{el}$ . Pour ce faire, on applique un courant à la bobine de gauche (ci-après appelée bobine 1) sur laquelle est posée la masse inconnue.



Comme un champ magnétique se trouve à l'intérieur de la bobine 1, une force électromagnétique est engendrée verticalement dans la direction opposée selon la formule de Laplace :  $F_{el} = IBL$



Cette formule exprime la force  $F_{el}$  agissant sur un fil de longueur  $L$  parcouru par un courant  $I$  dans un champ magnétique  $B$  lorsque la direction du fil est perpendiculaire au champ. On mesure le courant nécessaire pour compenser parfaitement la force de pesanteur, ce qui permet d'écrire :

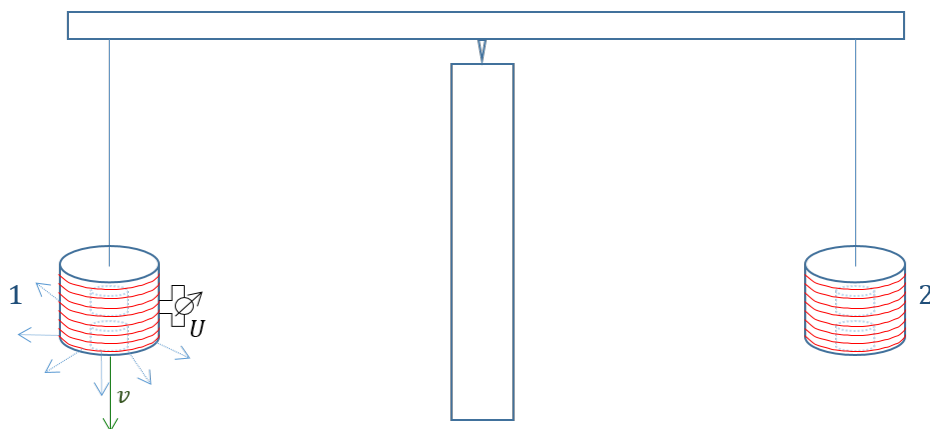
$$F_p = mg = F_{el} = IBL \tag{1}$$

Mais le produit  $BL$ , qui traduit l'interaction entre la bobine 1 et le champ magnétique, est très difficile voire impossible à calculer. C'est ici qu'intervient la phase dynamique pour contourner cette difficulté.

#### • Phase dynamique

La phase dynamique se base sur le principe de Faraday, qui stipule que le déplacement d'un conducteur à vitesse  $v$  dans un champ magnétique  $B$  induit une tension  $U$ . Un courant qui circule dans la seconde bobine (bobine 2) génère une force (de Laplace) qui fait bouger les deux bobines. La bobine 2 sert uniquement de moteur, et on mesure la tension induite dans la bobine 1 qui devient donc un générateur. Ainsi la même bobine 1 est utilisée pour la phase statique et la phase dynamique. La bobine bouge perpendiculairement au champ magnétique  $B$ . Avec la loi d'induction, on peut montrer que :

$$U = vBL \quad (2)$$



Nous retrouvons à nouveau le même produit  $BL$  que pour la phase statique car la configuration bobine-aimant est la même. En réarrangeant les équations (1) et (2) et en y substituant le produit  $BL$ , nous obtenons :

$$\frac{mg}{I} = \frac{U}{v} \Leftrightarrow mgv = UI \quad (3)$$

On reconnaît une équation de puissance : puissance mécanique à gauche et électrique à droite. C'est la raison pour laquelle cette balance est nommée balance du watt, qui est l'unité utilisée pour exprimer une puissance. En recombinaison cette équation, on obtient une équation pour la masse :

$$m = \frac{UI}{gv} \quad (4)$$

On peut donc trouver la valeur d'une masse inconnue en mesurant un courant  $I$ , une tension  $U$  et une vitesse  $v$ , sans que la masse n'intervienne.

## 4. Description de la balance en bois

Le socle, les piliers et le balancier de ma balance sont en bois, obtenu dans un atelier de menuiserie. Les bobines, également en bois, tout d'abord usinées par mon frère sur un tour de son entreprise à partir d'un poteau circulaire, ont été ensuite bobinées à METAS avec du fil de cuivre et fixées au balancier à l'aide de ficelles suspendues à des crochets. Elles sont trouées en leur centre afin d'y placer les aimants en répulsion nécessaires pour créer le champ magnétique. Un pivot en métal posé sur une petite plaquette de verre a été la méthode choisie pour poser le balancier sur les piliers de la balance en ayant le moins de frottement possible.

Un petit laser est fixé au balancier, juste au-dessus de la bobine 1. Ali Eichenberger, chef de projet de la balance du watt à METAS, a fourni le capteur, le laser ainsi que de nombreux conseils.



Figure 3 – Les bobines sont mobiles et se déplacent verticalement autour des aimants fixes.

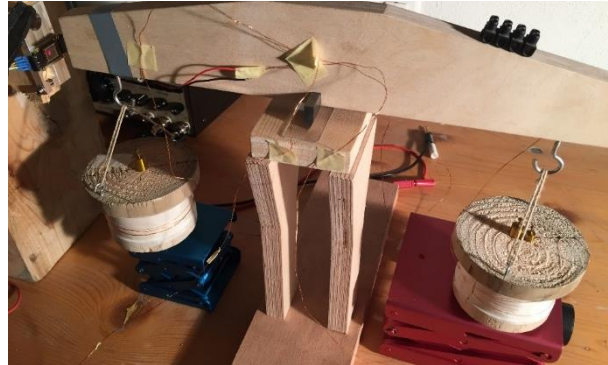


Figure 4 – Le laser projeté contre un détecteur sensible de position permet de mesurer le déplacement de la bobine.

## 5. Mesure des variables

- Pour une balance du watt « officielle » : précision quantique

À METAS, l'Institut fédéral de métrologie suisse possédant une des cinq balances du watt mondiales, les variables  $U$  et  $I$  sont mesurées avec une extrême précision à l'aide de deux effets quantiques, respectivement l'effet Josephson pour la tension et l'effet Hall quantique pour le courant. L'effet Josephson consiste à exposer une jonction isolante séparant deux matériaux supraconducteurs à des micro-ondes d'une fréquence  $f$  (pour donner un ordre de grandeur, cette fréquence vaut des dizaines de GHz), calculable très précisément. Cela induit une tension de référence  $U_j$  exprimée en fonction de  $f$ , de la charge de l'électron  $e$  ainsi que de la constante de Planck  $h$ . À cette tension  $U_j$  peut ensuite être comparée la tension  $U$  obtenue lors de la phase dynamique. Cette méthode permet donc de définir  $U$  de manière quantique. Pour mesurer le courant  $I$  également de manière quantique, on utilise la loi d'Ohm  $I = U/R$ . La tension est à nouveau comparée à l'effet Josephson, et  $R$  est comparé à la résistance de Hall  $R_H$ , quantifiée par une équation faisant intervenir  $e$  et  $h$ . Dans ces deux effets, nous voyons apparaître la constante de Planck  $h$  qui a servi à redéfinir le kilogramme.

Après quelques calculs, on obtient une équation reliant directement  $h$  et la masse  $m$ . Jusqu'à présent,  $h$  était définie par la masse du kilogramme. À partir du mois de mai prochain, c'est le kilogramme qui sera défini par la constante de Planck.

- Pour une balance en bois

Ma balance est un modèle simplifié des balances du watt officielles. À l'échelle de mon expérience, relier la masse à la constante de Planck en comparant  $U$  et  $I$  avec les effets quantiques mentionnés ci-dessus n'aurait pas été possible. J'ai pu tout de même atteindre le but de cette expérience, qui était de mesurer une masse en connaissant  $I$ ,  $U$  et  $v$  (voir équation 4).

J'ai donc utilisé un multimètre pour mesurer le courant  $I$  qu'il faut faire passer dans la bobine lors de la phase statique pour compenser la force de pesanteur engendrée par la masse  $m$  (voir équation 1).

Lors de la phase dynamique,  $U$  n'est pas constant et ne peut pas être mesuré simplement à l'aide d'un multimètre, car le balancier fait de continuel allers-retours et la tension acquise par la bobine 1 est donc exprimée par une courbe sinusoïdale. Pour mesurer la tension, on peut soit utiliser un oscilloscope, ou alors connecter les deux extrémités de la bobine à un boîtier d'acquisition de signaux électriques relié à un ordinateur et piloté avec le logiciel LabVIEW. Cette deuxième solution a l'avantage d'enregistrer en tous points la tension acquise par la bobine, dont les données peuvent ensuite être traitées dans un tableau Excel.

Il faut également mesurer la vitesse  $v$  du déplacement de la bobine pour la phase dynamique. Pour ce faire, la méthode la plus simple est de placer un laser juste au-dessus de la bobine 1 dont le faisceau balaie un mur sur lequel on place une règle. Une deuxième solution est d'utiliser un détecteur sensible de position (figure 4) afin de pouvoir enregistrer la position point par point et pouvoir ensuite ouvrir les données dans un tableau Excel. La figure 5 montre les courbes sinusoïdales de la tension induite  $U$  et de la vitesse  $v$  en fonction du temps.

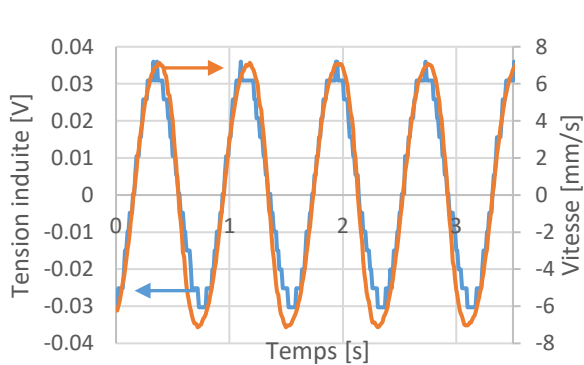


Figure 5 – Les courbes de la tension induite et de la vitesse ont bien la même forme, comme le prédit la loi de Faraday (équation (2)).

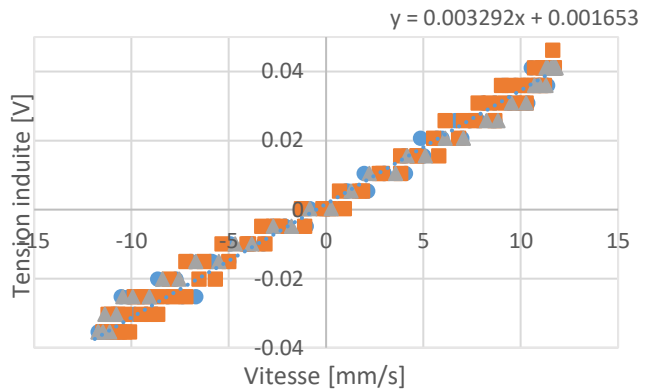


Figure 6 – La pente correspond au rapport  $U/V = BL_{\text{dyn}}$ .

La masse a été mesurée d'après l'équation (4) en mesurant  $I, U, v$  et en prenant  $g = 9,806 \text{ m/s}^2$ .

## 6. Conclusion

Ce travail a permis de démontrer qu'il est possible de mettre en œuvre le principe de la balance du watt en utilisant des composants facilement disponibles et d'obtenir des résultats satisfaisants. Avec ma balance, le meilleur résultat obtenu n'a que 1,9 % de marge d'erreur : j'ai mesuré environ 9,81 g pour une masse de 10 g.

J'ai aussi pu comprendre un peu mieux les difficultés que les métrologues travaillant sur la balance du watt expérimentaient chaque jour : par exemple, après avoir mis une masse sur un des plateaux, devoir attendre que la balance s'équilibre et ne bouge plus, ou alors lorsque la bobine réalise des faibles rotations autour de son axe durant le mouvement vertical de la phase dynamique.

On pourrait également améliorer la qualité de la balance en augmentant le nombre d'enroulements dans les deux bobines afin d'augmenter la valeur de la tension induite de la bobine 1 et la force de Laplace produite par les bobines 1 et 2. D'autres améliorations souhaitables seraient de développer des supports mécaniques stables pour fixer les aimants par rapport aux bobines, de trouver une façon de suspendre les bobines rigidement au balancier pour éviter qu'elles ne tournent sur elles-mêmes, ainsi que de bien fixer les câbles électriques pour qu'ils perturbent le moins possible la mesure.