

# L'ampère et les unités électriques : de l'électrodynamique à la mécanique quantique

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Wilfrid POIRIER

Édité le  
09/05/2022

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

*Cette ressource est issue d'une publication du numéro 105 de La Revue 3EI de juillet 2021. Wilfrid Poirier est Directeur de recherche au Laboratoire national de métrologie et d'essais.*

La métrologie moderne, fruit de la révolution française, vise à fournir des références universelles des grandeurs physiques pour favoriser les échanges scientifiques, industriels et commerciaux. A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, la formidable croissance de l'industrie électrique a conduit les métrologues à compléter le système des unités mécaniques par une unité électrique, l'ampère, dont le nom fut choisi en l'honneur du découvreur du courant électrique et de ses propriétés électrodynamiques, André-Marie Ampère. Mais ce n'est qu'en 1948 que sa définition est fondée sur la loi d'Ampère et la fixation de la constante magnétique du vide, initiant ainsi une nouvelle évolution du système d'unités. En 2019, une révision historique du Système International d'unités (SI) est mise en œuvre. Débarrassé des artéfacts, il est désormais fondé sur les constantes de la nature. La nouvelle définition de l'ampère établie à partir de la charge élémentaire permet désormais d'exploiter au mieux certains phénomènes quantiques et les découvertes scientifiques les plus récentes pour améliorer la mesure des grandeurs électriques et de celles qui en dépendent, et ce, au profit des utilisateurs.

Cette ressource présente, après un historique de la métrologie et en particulier de la métrologie électrique, l'unité ampère et ses réalisations de sa création jusqu'à la révision historique du Système International de 2019 fondée sur les constantes de la nature.

## 1 – La métrologie moderne

La métrologie moderne est née de la révolution française. Une des doléances exprimées par les citoyens à l'occasion des états généraux concernait en effet une demande d'uniformisation des poids et mesures (fig.1).

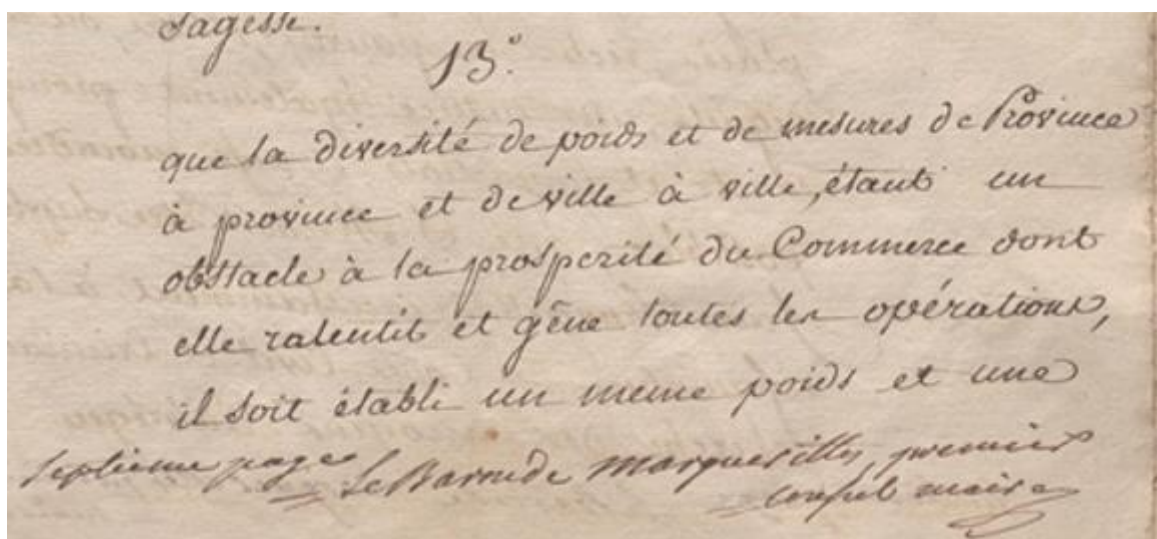


Figure 1 : Extrait du cahier de doléances de Nîmes (1789). Arch. dép. du Gard : C 1196.

Il existait alors plus de 800 mesures en usage en France : perche, toise, pied, pouce, aune, muid, setier, boisseau, pinte, livre, once, grain, cannes, etc. Cette pléthore de mesure compliquait considérablement les échanges commerciaux. Sous l'impulsion de l'académie des sciences et des physiciens tels Lagrange, Laplace, Monge, mais aussi Borda et Lavoisier, la révolution répond à cette demande d'universalisme par l'adoption du système métrique le 1<sup>er</sup> août 1793. Le mètre devient l'unité de longueur, et est défini comme étant la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. Le décret du 7 avril 1795 vient ensuite établir le système métrique décimal [1]. Sept années de travaux furent cependant nécessaires à Delambre et Méchain pour étalonner la toise par rapport au mètre par le biais de mesures de triangulation qui s'étendaient de Dunkerque à Barcelone. Enfin, le 22 juin 1799, les étalons de poids et de longueur, donc le mètre, dit des Archives purent être adoptés [2]. L'internationalisation des unités s'est concrétisée en 1875 par la signature de la convention du mètre [3] par dix-huit pays et par la création du Bureau international des poids et mesures, BIPM, chargé de conserver les étalons internationaux de masse et de longueur. Il prend place au pavillon de Breteuil en France. En 1889, a lieu la première Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) [4]. De nouvelles définitions des unités de masse et de longueur sont alors adoptées, à l'unanimité, comme il sera de coutume pour toutes les résolutions signées lors de ces conférences.

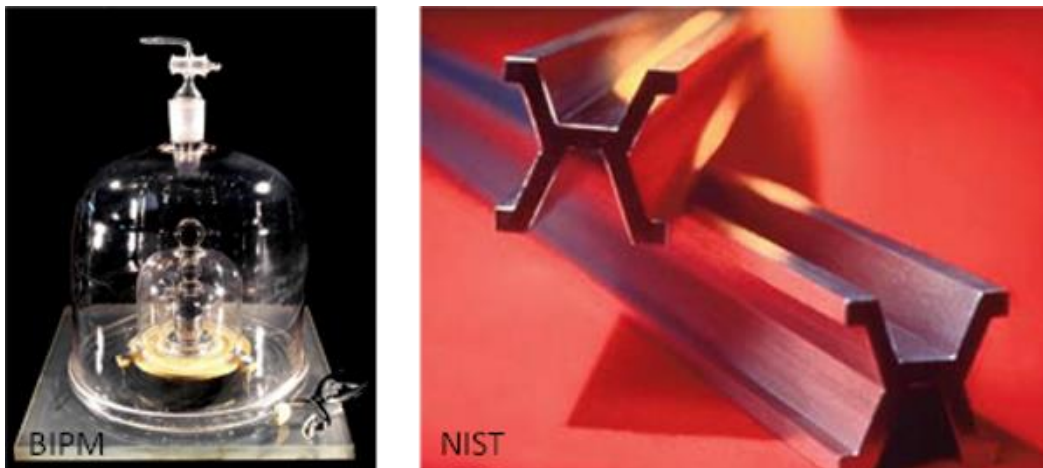


Figure 2 : Le Prototype International du kilogramme (à gauche) et le mètre étalon (à droite) adoptés en 1889 lors de la première CGPM.

Ces définitions sont matérialisées par des étalons : le prototype international du kilogramme (PIK), dit le grand K, et le mètre étalon dont la définition précise désormais la température de la glace fondante pour son utilisation (fig.2).

## 2 – La fée électricité

L'électricité dont certaines manifestations étaient connues des hommes depuis longtemps, telles que la foudre ou le magnétisme des aiguilles de la boussole, ne se voit caractérisée par des grandeurs physiques qu'à partir du 18<sup>ème</sup> siècle [5]. On citera la charge électrique qui se manifeste dans la balance de Coulomb en 1785 et la tension électrique aux bornes de la pile de Volta en 1800. Mais c'est en 1820 que la grandeur « courant électrique » est découverte par André-Marie Ampère à la suite de l'expérience clef d'Ørsted démontrant la déviation de l'aiguille d'une boussole orthogonalement au passage « d'électricité » dans un fil [6]. Acceptant cette révélation que magnétisme et électricité sont intrinsèquement liés, il identifie cette nouvelle grandeur physique et découvre les propriétés électrodynamiques en s'appuyant sur des expériences de principe et en usant des méthodes de détection [7] de « zéro » qui sont aujourd'hui au cœur des comparaisons métrologiques. C'est le point de départ d'innovations liées à l'électricité, portées par des ingénieurs et des inventeurs, qui vont stimuler une seconde révolution industrielle à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. On citera la dynamo électrique de Werner von Siemens, le téléphone de Graham Bell,

l'éclairage électrique avec l'ampoule d'Edison, le moteur électrique synchrone de Nikola Tesla ou bien le cinématographe des frères Lumière. La première ville française, Bellegarde, est éclairée à l'électricité en 1884 sous l'impulsion de l'ingénieur Louis Dumond. De leur côté, les scientifiques poursuivent leurs avancées. Maxwell synthétise toutes les propriétés électromagnétiques du vide dans un jeu d'équations qui feront apparaître les constantes magnétique et électrique du vide ainsi que la vitesse de la lumière.

### 3 – Genèse de la métrologie électrique

Porté par cette effervescence scientifique et technique, se tient le premier congrès international des électriciens en 1881, à Paris. Il rassemble autant de scientifiques émérites que d'ingénieurs marquants : Sir William Thomson, Werner von Siemens, Mascart, Lord Rayleigh, Becquerel, Fizeau, Helmholtz, Kirchhoff, *et cetera*... Un des sujets du congrès concerne les unités électriques. Les scientifiques désirent un système d'unités proches de la science et les ingénieurs veulent plutôt des étalons pratiques. Les résolutions adoptées seront le fruit d'un compromis [8]. La cinquième résolution attribue le nom Ampère à l'unité de courant qui est défini comme le courant produit par un volt dans un ohm. Des définitions du coulomb et du farad sont également établies. A la demande de Mascart, Sir William Thomson est chargé d'expliquer le sens de ces résolutions. Celui-ci précise que les unités fondées sur les unités fondamentales CGS ne seraient pas pratiques, certaines étant trop grandes, d'autres trop petites, et que donc, il a paru nécessaire d'en avoir des représentations concrètes, par le biais d'un étalon de résistance défini par une colonne de mercure.

*gner et les rendre accessibles. La Commission, désireuse de rattacher au système les noms d'Ampère, le fondateur de l'électro-dynamique, et de Coulomb, à qui l'on doit les premières déterminations et le fondement de la science de l'électro-statique, propose de donner les noms d'ampère et de coulomb aux mesures de courant et de quantité d'électricité. Enfin le nom de Faraday sera aussi conservé dans le farad, comme mesure de capacité.*

Figure 3 : Extrait des Comptes Rendus des travaux du Congrès International des Electriciens, Paris, 1881 [8]

Il justifie également les noms des savants attribués aux unités électriques. André-Marie Ampère est reconnu comme le fondateur de l'électrodynamique (fig.3) !

La première CGPM se tient en 1889 mais les unités électriques n'y sont pas traitées ; ce travail restant au soin de la conférence internationale des électriciens. En revanche, en 1913, à l'occasion de la 5<sup>ème</sup> CGPM, le système M.K.S (Mètre, Kilogramme, Seconde) est adopté et les unités électriques sont redéfinies [9]. L'unité d'intensité de courant est l'Ampère international. Il correspond au courant uniforme qui, conformément à la spécification donnée, dépose 0,00111800 gramme d'argent par seconde, par électrolyse d'une solution aqueuse de nitrate d'argent. Cette unité représente pratiquement le courant invariable qui, passant dans un conducteur dont la résistance est 1 ohm international, dissipe sous forme de chaleur la puissance de 1 watt. C'est une unité dérivée. La seule unité électrique de base est l'ohm international qui est toujours définie à partir d'une colonne de mercure. Les unités dites « absolues » C.G.S sont donc abandonnées pour les unités électriques. En 1927, le BIPM est chargé de conserver les étalons électriques et de réaliser les comparaisons avec les étalons nationaux [10]. Cela répond au besoin croissant de références électriques lié au développement de l'industrie électrique. En 1933, la volonté est exprimée de substituer aux unités dites internationales des unités plus fondamentales ! Mais la guerre reporte cette ambition. C'est en 1948, que le système M.K.S.A [11], essentiellement développé d'après les travaux de Giovanni Giorgi, est adopté : l'ampère devient l'unité de base électrique avec une définition fondée sur la force d'ampère. Une généralisation est faite en 1960 avec l'adoption du système international d'unités (SI) fondé sur sept unités de base, dont l'ampère [12].

## 4 – L'ampère dans le SI (1948-2019) : triomphe de l'électrodynamique

Depuis 1960, le SI [13], qui est un système cohérent et irréductible d'unités, évolue au gré des découvertes scientifiques (fig.4). Jusqu'à la veille de l'application de la révision historique décidée lors de la 26<sup>ème</sup> CGPM, le kilogramme était toujours défini par le PIK fabriqué en 1889. En 1967, les progrès en physique atomique ont permis de définir la seconde en fixant la fréquence de la transition énergétique entre deux niveaux du césium 133. En 1983, la maîtrise de la physique des lasers a permis de définir le mètre en fixant la valeur de la vitesse de la lumière. Quant à l'unité de courant électrique, elle était définie depuis 1948 d'après la force d'Ampère et la fixation de la constante magnétique du vide  $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup> : l'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à  $2\times 10^{-7}$  newton par mètre de longueur. Par ailleurs, le volt est défini à partir du watt et de l'ampère, et l'ohm à partir du volt et de l'ampère en appliquant la loi d'Ohm. Cette définition de l'ampère fut la première à être fondée sur la fixation d'une constante de la nature, ce qui la rendait plus universelle. Remarquons également que les unités électriques étaient donc définies à partir des unités mécaniques, ce qui impliquait que leurs réalisations fussent fondées sur des expériences électromécaniques.

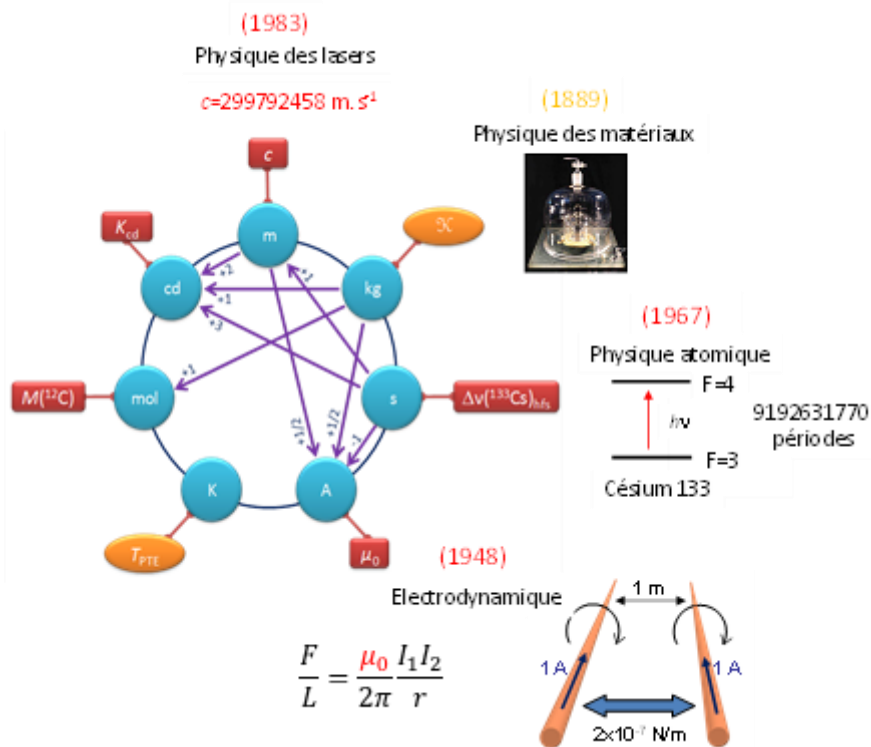


Figure 4 : Le SI avant la révision adoptée lors de la 26<sup>ème</sup> CGPM

L'ampère fut réalisé par des applications plus ou moins directes de sa définition à partir de  $\mu_0$ . La figure fig.5a) présente une balance de l'ampère. Ce type de balance permettait la comparaison de la force magnétique exercée entre deux bobines concentriques traversées par un courant et le poids d'une masse dans le champ de gravité [14]. Mais les incertitudes atteintes ne diminuèrent pas en dessous de quelques  $10^{-6}$ , en valeur relative. La définition de l'ampère validant toute la théorie de l'électromagnétisme, le volt fut alors réalisé, avec des incertitudes plus faibles à partir de la constante électrique du vide  $\epsilon_0=1/\mu_0 c^2$  par la mise en œuvre d'une balance qui comparait la force électrostatique aux bornes d'une capacité et un poids. Ensuite, le farad put être réalisé avec des incertitudes relatives encore plus faibles, de quelques  $10^{-8}$ , en utilisant un étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard [15] fondé sur un théorème mathématique (fig.5b).

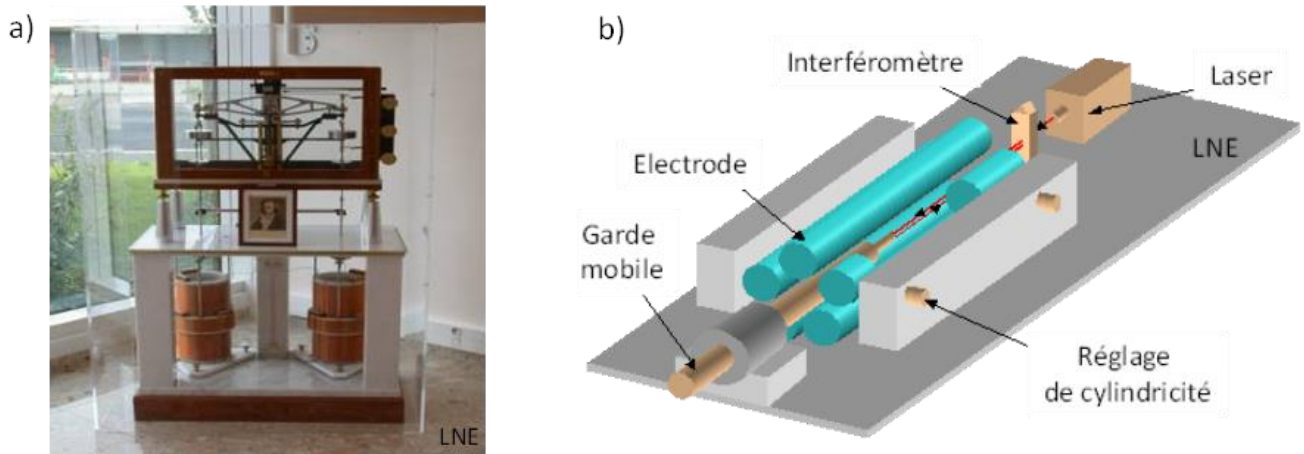


Figure 5 : a) Image d'une balance de l'ampère du LNE. b) Schéma représentant un étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard (LNE)

Les réalisations précédemment évoquées ne pouvant être mise en œuvre très régulièrement du fait de leur complexité, il était nécessaire de conserver les unités électriques en utilisant des étalons matériels.

Des bases nationales de résistances (fig.6a), par exemple étalonnées à partir du farad, ainsi que des bases nationales de piles Weston puis de diodes Zener (fig.6b) furent constituées pour conserver respectivement l'ohm et le volt dans chaque pays. Evidemment, ces étalons matériels souffraient de dépendance à la température et à la pression et étaient sensibles aux déplacements, ce qui conduisait à une augmentation des incertitudes de mesure de la résistance et de la tension.

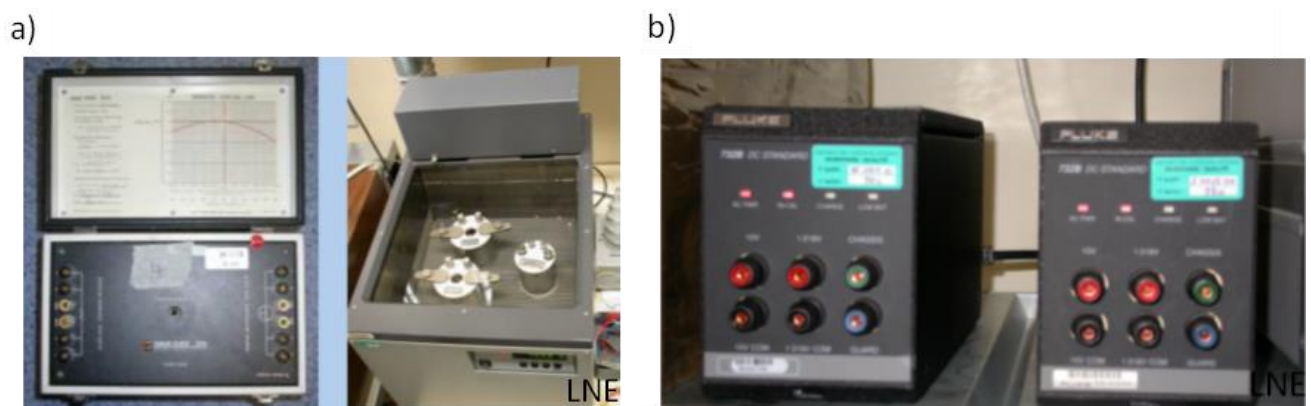


Figure 6 : a) Images d'étalons secondaires de résistance et b) de tension (références à diode Zener)

## 5 – La révolution quantique

La percée dans la réalisation des unités électriques est venue de la révolution quantique qui a notamment conduit à la compréhension des propriétés de transport des électrons [16]. Deux effets quantiques de l'état solide ont vraiment révolutionné la métrologie électrique.

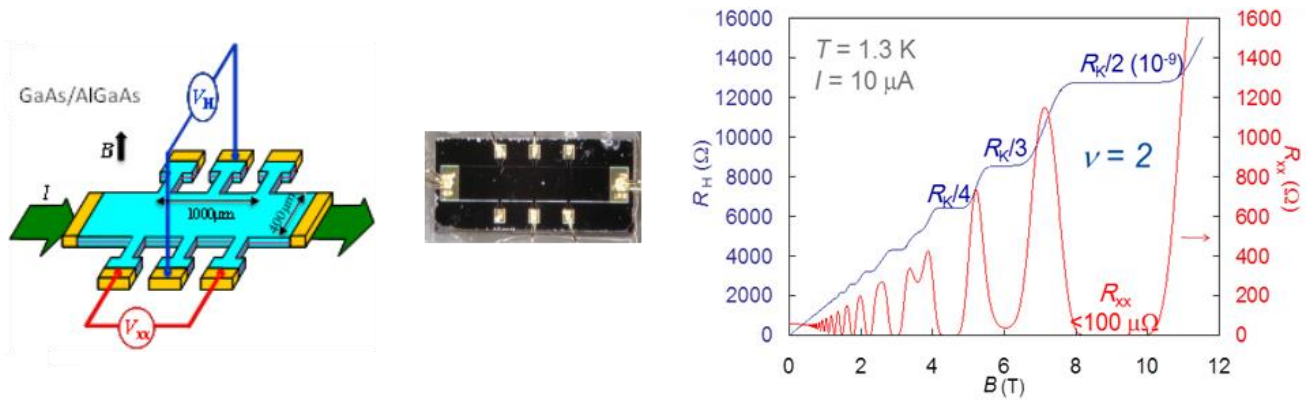


Figure 7 : (à gauche) Schéma et image d'une barre de Hall réalisée à partir d'une hétérostructure GaAs/AlGaAs ; (à droite) Évolution des résistances de Hall ( $R_H$ ) et longitudinales ( $R_{xx}$ ) mesurées dans une barre de Hall en fonction de l'induction magnétique  $B$

L'effet Hall quantique (EHQ), découvert par Klaus von Klitzing en 1980 [17], se produit dans les conducteurs bidimensionnels soumis à un champ magnétique perpendiculaire (fig.7). En faisant varier le champ magnétique, il se manifeste à basse température (quelques kelvins) par la quantification de la résistance transverse, appelée résistance de Hall, aux valeurs  $R_K/i$ , où  $R_K = h/e^2$ ,  $h$  est la constante de Planck,  $e$  est la charge élémentaire et  $i$  est un entier. Le plateau de résistance  $R_K/2$ , observé à des inductions magnétiques autour de 10 T dans les gaz d'électrons bidimensionnels fabriqués à partir d'hétérostructures en arséniure de gallium est généralement utilisé comme référence en métrologie primaire.

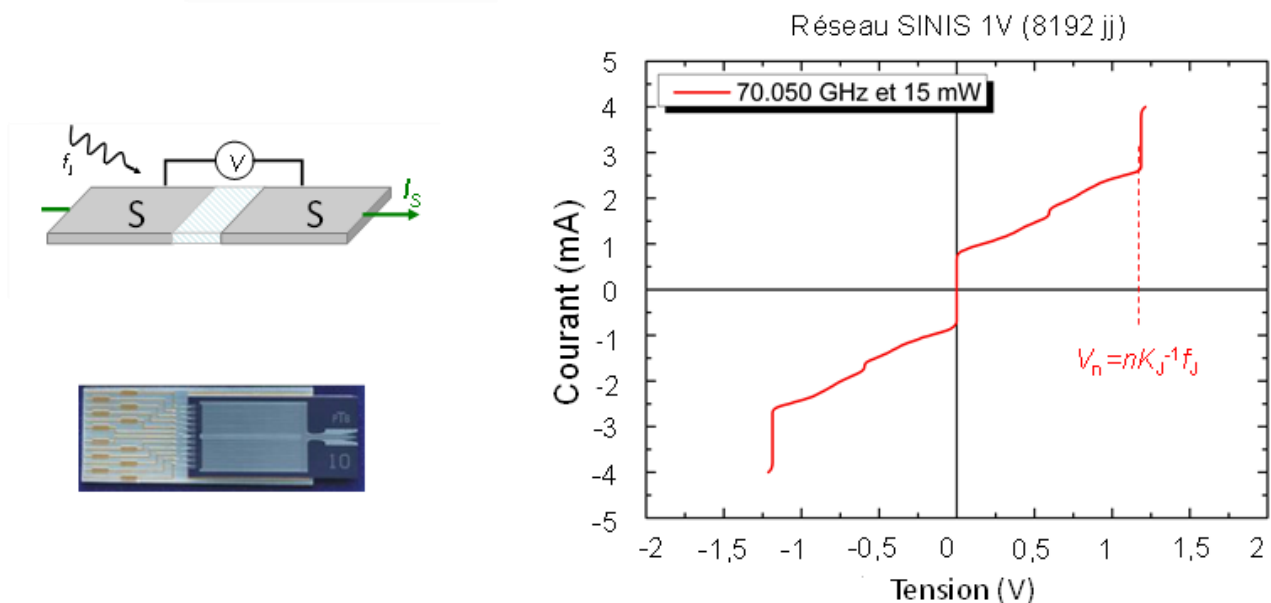


Figure 8 : (à gauche) Schéma d'une jonction Josephson irradiée et image d'un réseau Josephson ; (à droite) Courbe typique courant/tension d'un réseau Josephson mettant en évidence les marches de tension aux valeurs  $V_n = nK_J^{-1}f_J$

L'effet Josephson (EJ) découvert en 1962 [18] se produit dans des jonctions séparant deux supraconducteurs irradiés par un signal radiofréquence de fréquence  $f_J$  (fig.8). En faisant varier le courant, il se manifeste par la quantification de la tension aux valeurs  $n f_J / K_J$ , où  $K_J = 2e/h$  et  $n$  est un entier relatif [19]. Ces deux effets produisent des étalons de résistance et de tension universels dont la reproductibilité relative est meilleure que  $10^{-10}$ . Avant la découverte de ces deux effets quantiques, la dispersion relative des réalisations de l'ohm et du volt par les instituts nationaux de métrologie était d'environ  $10^{-6}$ . Désormais, les réalisations des étalons primaires de résistance et de tension par la mise en œuvre de l'EHQ et de l'EJ s'accordent entre elles avec des incertitudes

relatives de quelques  $10^{-10}$  (fig.9a et 9b). Ils ont donc apporté une amélioration de trois ordres de grandeur de la traçabilité des mesures de résistance et de tension [20].

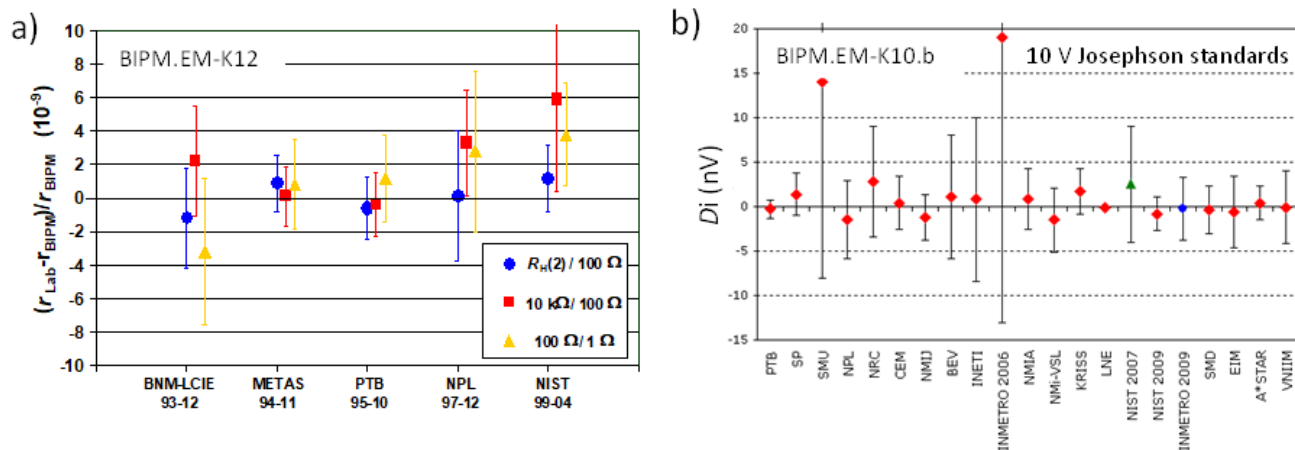


Figure 9 : Comparaison des mesures de résistance et de tension entre des laboratoires nationaux de métrologie et le BIPM : a) Écarts relatifs  $(r_{\text{Lab}} - r_{\text{BIPM}}) / r_{\text{BIPM}}$  des mesures de résistance, figure établie à partir des données de [21] ; b) Écarts  $D_i = U_{\text{Lab}} - U_{\text{BIPM}}$  des mesures de tension (10 V), figure établie à partir des données de [22]

Pourtant, l'exploitation des effets quantiques se heurtait aux limites imposées par les définitions du SI, et notamment celle de l'ampère [16]. En effet, l'EHQ et l'EJ fournissent des étalons de résistance et de tension exceptionnellement reproductibles, mais dont les valeurs en ohm et en volt nécessitaient respectivement les déterminations de  $R_K$  et  $K_J$  en unités SI. Etant donné la définition de l'ampère à partir du newton, ces déterminations s'appuyaient sur des expériences électromécaniques complexes : étalon calculable de capacité associé au pont de quadrature pour  $R_K$ , balance du volt ou balance de Kibble pour  $K_J$ . Elles conduisaient à des incertitudes de mesure beaucoup plus élevées que la reproductibilité même des effets quantiques. Toutes les unités électriques, y compris l'ampère lui-même, subissaient ces limitations. Un artifice avait été mis en œuvre en 1990 pour résoudre cette difficulté : des valeurs conventionnellement vraies avaient été adoptées pour  $R_K$  et  $K_J$  :  $R_{K-90}$  et  $K_{J-90}$ . Ayant des valeurs fixes, elles n'étaient pas entachées d'incertitudes. Cet artifice créait un système de représentations des unités électriques, les réalisations SI supposant de rajouter les incertitudes de détermination de  $R_K$  et  $K_J$ . Il en résultait des représentations universelles mais d'une certaine manière, hors SI ! Cette situation, insatisfaisante fut un des arguments majeurs de révision profonde du Système International d'unités. Mais d'autres arguments s'imposaient [23]. Tout d'abord, le kilogramme était fondé sur un artéfact dont les comparaisons avec ces copies, fabriquées en 1889 aussi, montraient une potentielle dérive de masse, de quelques  $10^{-8}$  en valeur relative. Par ailleurs, le principe d'un artéfact unique s'accordait mal avec l'exigence d'universalité des définitions. Or, il était devenu possible de réaliser le kilogramme à partir de la constante de Planck en utilisant la balance de Kibble pour comparer la puissance électrique étalonnée par  $R_K$  et  $K_J$  avec la puissance mécanique du poids [24]. La réalisation du kelvin se heurtait à la reproductibilité de réalisation du point triple de l'eau. Donc, il apparaissait plus universel de définir l'unité de température à partir de la constante de Boltzmann  $k$ . Enfin, comme nous l'avons évoqué, un moyen de tirer pleinement bénéfice des étalons quantiques était de réaliser les unités électriques directement à partir de  $h$  et  $e$ , ce qui supposait d'adopter les théories quantiques. Un long travail de plus 15 ans fut donc entrepris pour préparer une révision du SI. Il s'agissait de mettre au point les réalisations des unités à partir des constantes de la nature, de déterminer ces constantes, notamment  $h$  et  $e$ , avec les meilleures incertitudes dans le système d'unités précédant la révision, de confirmer la validité des théories quantiques, dont celles des égalités de  $R_K$  avec  $h/e^2$  et de  $K_J$  avec  $2e/h$  avec des incertitudes de mesure réduites [16].

## 6 – La révision historique du SI et la nouvelle définition de l'ampère



Figure 10 : Logo représentant le nouveau SI

Enfin, le 16 novembre 2018 fut adoptée, à l'occasion de la 26<sup>ème</sup> CGPM, une révision historique du SI (fig.10) fondé sur sept constantes [16,23,25,26] :  $h$ ,  $c$ ,  $\Delta\nu_{Cs}$ ,  $e$ ,  $k$ ,  $N_A$ ,  $K_{cd}$ , où  $\Delta\nu_{Cs}$  est la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé,  $N_A$  est la constante d'Avogadro et  $K_{cd}$  est l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz. Ces constantes permettent de respectivement définir le kilogramme, le mètre, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et le candela. Le kilogramme est donc désormais défini à partir de  $h$  et n'est donc plus matérialisé par un artéfact ! Cette révision du SI correspond à l'adoption des théories de la mécanique quantique et de la physique statistique.

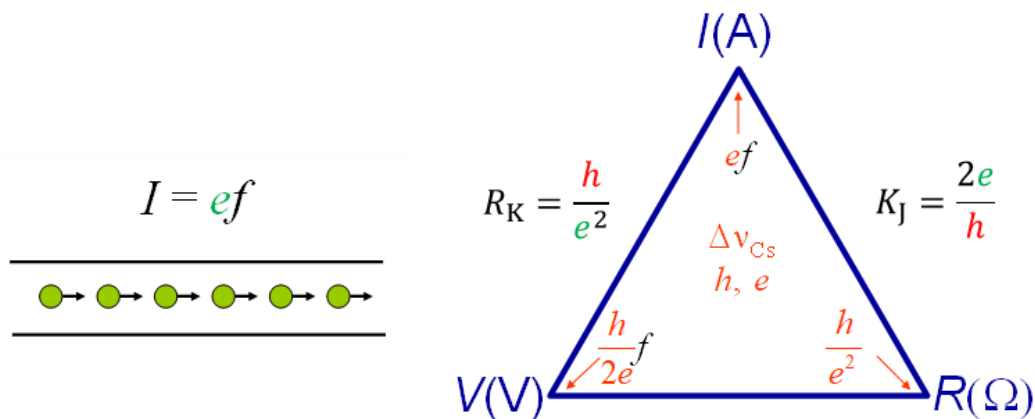


Figure 11 : Réalisation des unités électriques à partir des constantes  $h$  et  $e$

La nouvelle définition de l'ampère est donc fondée sur la charge élémentaire [26]. Plus précisément, l'ampère, symbole  $A$ , est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire,  $e$ , égale à  $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  lorsqu'elle est exprimée en  $C$ , unité égale à  $As$ , la seconde étant définie en fonction de  $\Delta\nu_{Cs}$ , la fréquence de transition du césium 133. L'ampère correspond donc à la circulation d'un certain nombre de charges élémentaires par unité de temps (fig.11). Le courant électrique, exprimée en ampère, peut donc s'écrire  $I = ef$  où  $f$  est une fréquence. Le volt est relié à  $(h/2e)f$  et l'ohm à  $h/e^2$ . Les unités électriques sont donc définies à partir des constantes  $h$  et  $e$ , et ne sont plus asservies aux unités mécaniques.



## 7 – Les étalons quantiques

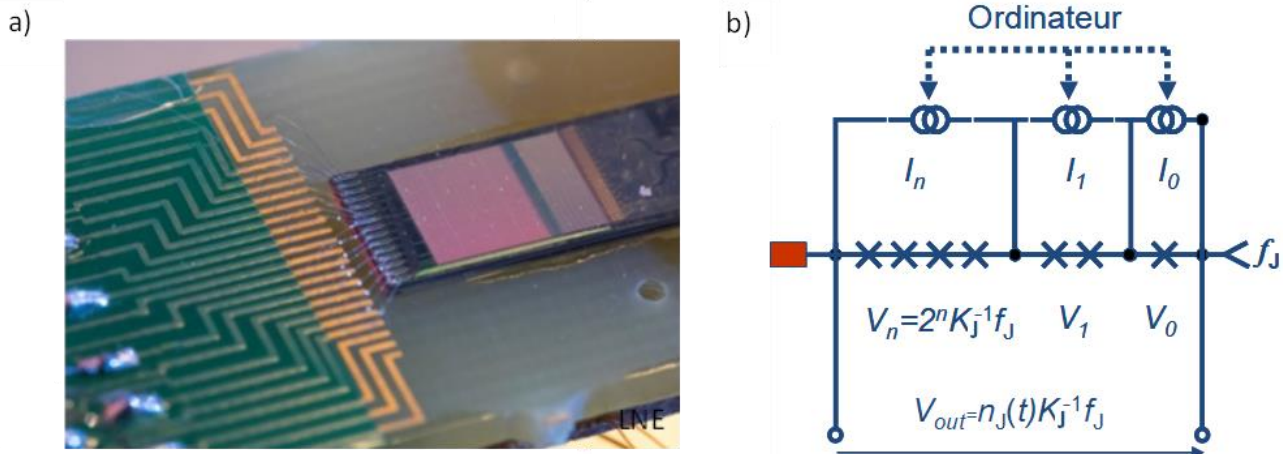


Figure 12 : a) Image d'un réseau programmable Josephson 1 V. Il est constitué de 7168 jonctions ; b) Schéma d'organisation des segments d'un réseau programmable à croissance binaire du nombre de jonctions Josephson.

Depuis, la découverte de l'effet Josephson alternatif en 1963, ont été développés les réseaux dits « conventionnels » fondés sur un grand nombre de jonctions en série, de 1 V puis de 10 V, puis ensuite les réseaux programmables et plus récemment les réseaux dits « impulsions » générant des signaux arbitraires [16]. Tous ces développements s'appuient sur la maîtrise des outils nanotechnologiques. En effet, les réseaux programmables Josephson (PJVS) reposent sur l'organisation en segments à croissance binaire d'un grand nombre de jonctions Josephson (fig.12). La tension délivrée par chaque segment peut être activée séparément. Le réseau fonctionne comme un convertisseur numérique/analogique quantique. Il peut ainsi être programmé pour générer un signal alternatif d'amplitude quantifiée.

L'EHQ fut découvert en 1980 dans un gaz d'électrons bidimensionnel obtenu en utilisant un Mosfet Silicium. Les hétérostructures en arséniure de gallium se sont ensuite avérées plus pratiques. Des réseaux de Hall ont également été développés pour obtenir des valeurs de résistance allant de  $100 \Omega$  à  $1 M\Omega$ . L'utilisation de l'EHQ a ensuite été étendue dans le régime des courants alternatifs [16,27].

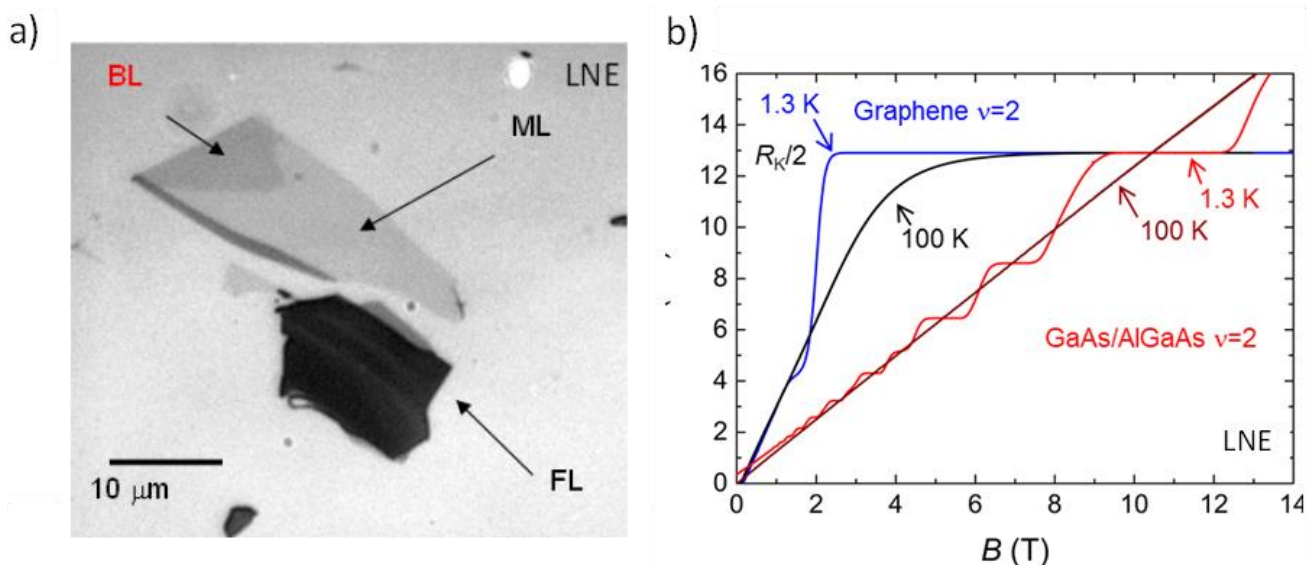


Figure 13 : Dispositifs en graphène : a) des monocouches (ML), bicouches (BL) et multi-couches (ML) de graphène déposées sur un substrat  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  ; b) Les résistances de Hall mesurées en fonction de l'induction magnétique  $B$  dans des échantillons de Hall fabriqués à partir d'une hétérostructure GaAs/AlGaAs (en rouge) et de graphène (en bleu), source [29]

Les découvertes scientifiques les plus récentes sont mises à profit pour la métrologie électrique. Ainsi, le graphène (fig.13a), monocouche d'atomes de carbone organisés selon un réseau en nid d'abeille dont les propriétés électroniques ont été révélées par Geim et Novoselov [28] en 2004 (leurs travaux furent récompensés par le prix Nobel en 2010), permet de développer un étalon quantique de résistance plus robuste et pratique fonctionnant à un champ magnétique plus faible (quelques teslas) et une température plus élevée (supérieure à la température de l'hélium liquide) [29]. La figure fig.13b met en évidence un plateau de résistance  $R_K/2$  mesuré dans un échantillon en graphène, obtenu par dépôt en phase vapeur d'un mélange propane/hydrogène sur carbure de silicium, s'étendant sur une très grande gamme d'induction magnétique et observable jusqu'à une température de 100 K.

## 8 – Les réalisations de l'ampère

Selon la nouvelle définition de l'ampère, le courant électrique peut s'écrire  $I=ef$ . Deux voies de réalisation quantique de l'ampère à partir de la fréquence et de la charge élémentaire ont été développées [16] : l'une exploite l'effet tunnel mono-électronique, l'autre applique la loi d'Ohm aux étalons quantiques de tension Josephson et de résistance de Hall (fig.14).

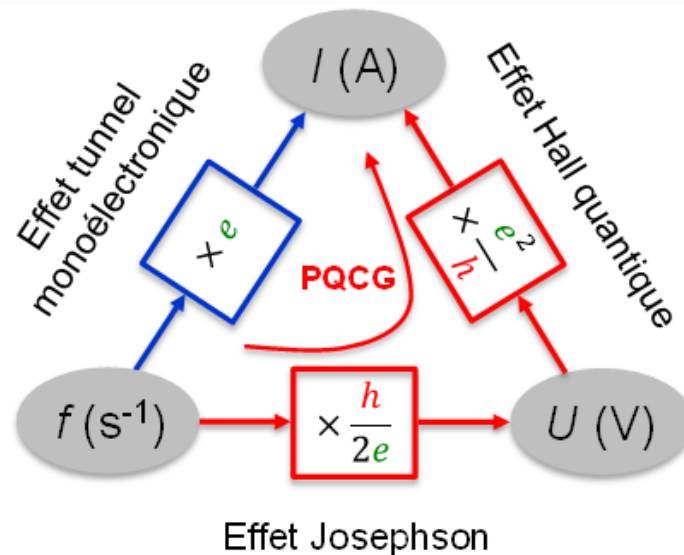


Figure 14 : Représentation de deux voies de réalisation quantique de l'ampère à partir de la fréquence : 1) (en bleu) en utilisant des dispositifs à effet tunnel mono-électronique, 2) (en rouge) en appliquant la loi d'Ohm aux étalons quantiques de tension Josephson et de résistance de Hall

La première voie consiste à utiliser un effet quantique de blocage électronique pour manipuler le passage des électrons un par un au travers d'un petit îlot isolé par des jonctions tunnel [30, 31]. En somme, ces dispositifs fonctionnent comme des pompes à électrons. Parmi les dispositifs les plus performants figurent ceux fondés sur un fil semi-conducteur traversé par deux grilles qui définissent un îlot nanométrique [32]. En faisant varier le potentiel d'énergie en dessous de la première grille avec un signal radiofréquence de fréquence  $f_p$ , il est possible d'amener un seul électron dans l'îlot puis de l'éjecter dans le sens direct. Cela permet la génération d'un électron par cycle, donc un courant égal au produit de  $ef_p$ . Un tel dispositif peut générer un courant de 160 pA pour une fréquence proche de 1 GHz. Malgré de récents progrès, les dispositifs à un électron génèrent de petits courants dont la quantification n'a pas été démontrée avec une incertitude relative inférieure à  $10^{-7}$ . Par ailleurs, leur fonctionnement reste mal compris et n'est pas considéré comme suffisamment reproductible pour en faire des étalons opérationnels quantiques à l'heure actuelle.

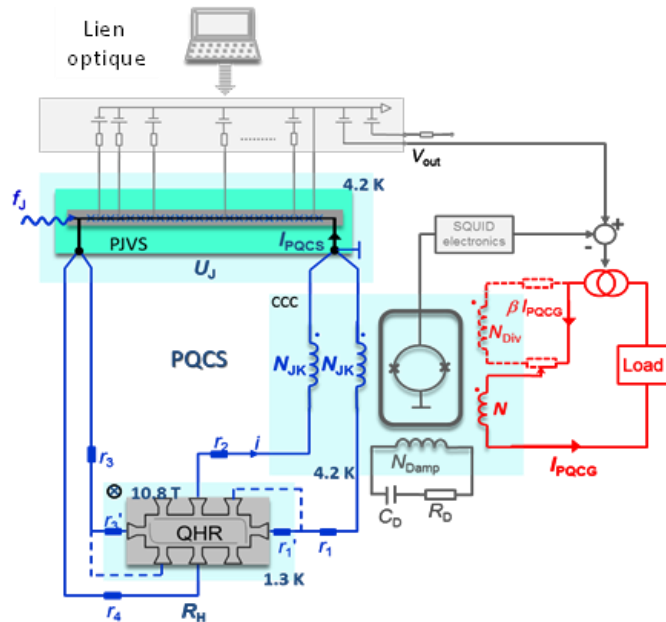


Figure 15 : Description schématique du PQCG (Programmable Quantum Current Generator). Le courant quantifié  $I_{PQCS}$  circulant dans la boucle PQCS est obtenu par connexion multiple d'un réseau Josephson de tension programmable (PJVS) à un étalon quantique de résistance (QHR). Il est utilisé comme référence pour asservir le courant de sortie  $I_{PQCG}$  par le biais du CCC

La seconde voie vise à appliquer la loi d'Ohm aux étalons quantiques de résistance et de tension [33]. La tension Josephson divisée par la résistance quantique de Hall donne un courant égal à  $n_1 e f$ , où  $n_1$  est le nombre de jonctions Josephson polarisées sur la marche de Shapiro  $n=1$ . Mais, mettre en œuvre cette réalisation avec exactitude se heurte à de nombreuses difficultés technologiques. Récemment, le LNE [33] a développé un générateur quantique de courant fondé sur ce principe et utilisant trois dispositifs quantiques (fig.15) : un étalon de tension Josephson programmable, un étalon de résistance de Hall quantique et un comparateur cryogénique de courant (CCC). Ce dernier dispositif est un transformateur « parfait » dont le principe est fondé sur l'application du théorème d'Ampère. Fonctionnant en courant continu et basse fréquence, il est capable de mesurer le rapport de deux courants en fonction du nombre de tours des deux enroulements de fils supraconducteurs dans lesquels ils circulent avec une incertitude relative de quelques  $10^{-11}$ . Son exactitude résulte de la réduction des fuites de flux magnétique par l'adoption d'un blindage supraconducteur des enroulements. L'utilisation d'un détecteur de flux magnétique fondé sur un SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) lui confère une sensibilité exceptionnelle. Le générateur quantique de courant peut générer des courants quantifiés de valeurs de  $1 \mu\text{A}$  à  $10 \text{ mA}$ . La quantification des courants générés en termes de la charge élémentaire a été démontrées avec une incertitude relative record de  $10^{-8}$ . Comme le présente la figure fig.16, ce générateur quantique de courant améliore la réalisation de l'ampère, typiquement de deux ordres de grandeur, sur une large plage de valeurs de courant. De manière générale, l'ensemble des améliorations récentes de la réalisation de l'ampère ouvre la voie à une nouvelle métrologie du courant électrique qui devrait être aussi performante que celle de la résistance ou de la tension [16] !

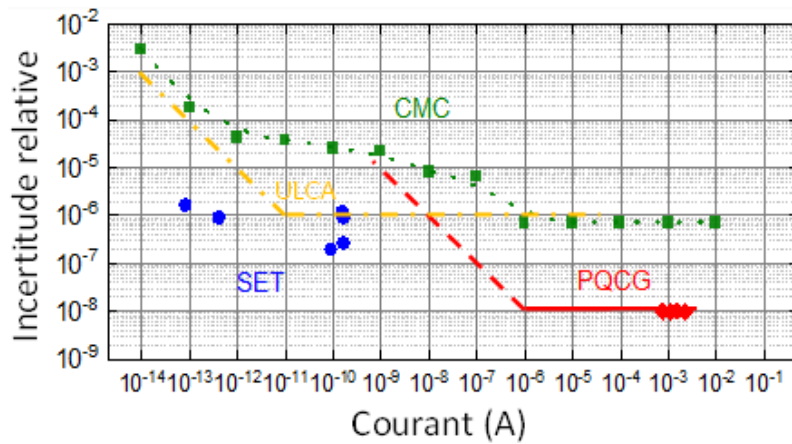


Figure 16 : Incertitudes relatives de mesure des réalisations de l'ampère : des meilleures capacités courantes des laboratoires nationaux de métrologie (CMC), des dispositifs à effet tunnel mono-électronique (SET), de l'instrument ULCA développé par le PTB et du générateur quantique de courant programmable du LNE développé par le LNE (PQCG)

## 9 – Les nouvelles applications des étalons quantiques

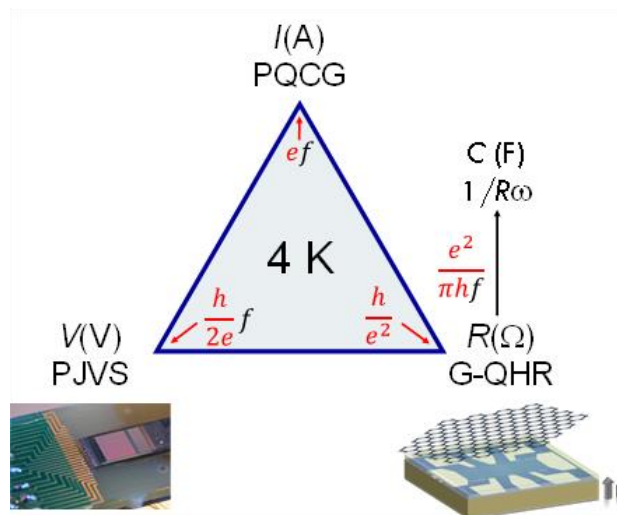


Figure 17 : Schéma décrivant le calibrateur quantique, réalisant le volt, l'ohm, l'ampère et le farad, fondé sur l'étalon de tension Josephson et de résistance de Hall en graphène à 4 K

La maturité atteinte par les étalons quantiques permet d'envisager dès à présent le développement d'un calibrateur quantique universel, un graal en métrologie électrique [16]. Ce dispositif consiste à combiner les étalons quantiques de tension Josephson et de résistance de Hall dans un seul cryostat à 4 K pour réaliser, le volt, l'ohm, l'ampère et le farad à partir des constantes  $h$  et  $e$  (fig.17). Cet objectif est désormais réalisable en s'appuyant sur de nouvelles technologies : les réseaux programmables de tension Josephson, les étalons quantiques de résistance en graphène qui peuvent fonctionner à une température plus élevée et un champ magnétique inférieur, le générateur quantique de courant, de nouveaux ponts d'impédance, et des systèmes cryogéniques plus pratiques et moins coûteux, fonctionnant sans hélium liquide. Dans cette perspective, des étalons quantiques 10 V refroidis sans le recours à l'hélium liquide, sont déjà commercialisés pour des applications en régime de courant continu et alternatif.

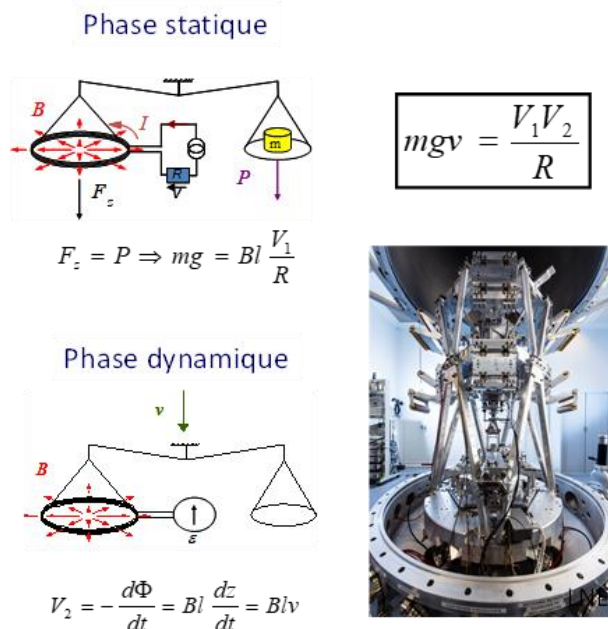


Figure 18 : Schéma des phases statique et dynamique de l'expérience de la balance de Kibble reliant le kilogramme à la constante de Planck  $h$ . Image de la balance de Kibble du LNE

Le kilogramme peut être réalisé à partir de la constante de Planck en utilisant une balance de Kibble (fig.18) [24]. L'expérience consiste à comparer la puissance mécanique d'une masse se déplaçant dans le champ de gravité à la puissance électrique étalonnée par les effets quantiques. Elle s'effectue en deux phases : la phase statique réalise l'équilibre entre le poids de la masse et la force magnétique qui s'exerce sur une bobine placée dans un champ magnétique radial et parcourue par un courant  $I$ . La phase dynamique correspond au déplacement à une vitesse  $v$  de la bobine dans le champ magnétique, ce qui génère une tension induite. La combinaison des équations des deux phases, tout en éliminant le facteur géométrique de la bobine dont la connaissance est imparfaite, conduit à l'équilibre des puissances. L'étalonnage des tensions et résistance en utilisant les constantes  $h/e^2$  et  $2e/h$  de l'effet Hall quantique et l'effet Josephson, conduit à une relation directe entre la masse et la constante de Planck. L'image de droite présente la balance de Kibble développée au LNE [35]. Elle permet de réaliser le kilogramme avec une incertitude relative de  $5 \times 10^{-8}$ , et vise  $10^{-8}$  dans un proche avenir. C'est la révision du SI, et notamment la fixation de la constante de Planck et de la charge élémentaire, qui permet bien aux balances de Kibble de réaliser le kilogramme, en remplacement du PIK.

Enfin, le kelvin peut être réalisé par mesure du bruit Johnson-Nyquist d'une résistance à une température donnée par comparaison avec celui généré par une source quantique de bruit fondé sur un réseau à commande impulsionnelle [36].

La métrologie fournit un cadre de référence pour que l'univers, tel qu'il est compris, puisse être décrit quantitativement par les hommes. Elle vise à trouver un juste équilibre entre les exigences de la science et celles de l'industrie : les unités se doivent d'avoir des définitions « fondamentales » et des réalisations « pratiques ». La révision historique du Système International d'unités répond à cette ambition : les nouvelles définitions intègrent la physique moderne par la fixation des constantes clefs de la nature. Les définitions sont universelles et ne contraignent pas les réalisations pratiques. Quant à l'ampère, il est redéfini à partir de la charge élémentaire. La nature microscopique du courant est donc reconnue. Les phénomènes quantiques permettent de réaliser l'ohm, le volt, le farad et l'ampère à partir de  $h$  et  $e$ , et au-delà du domaine électrique, le kilogramme en utilisant la balance de Kibble et même le kelvin.

Une nouvelle ère s'annonce pour la métrologie de l'ampère. S'appuyant sur le nouveau générateur quantique de courant développée au LNE, elle devrait, à l'avenir, être aussi performante que celle de l'ohm ou du volt. Par ailleurs, le contrôle des électrons un par un ouvre des perspectives nouvelles pour le développement de détecteurs ultra-rapides de signaux électriques [37].

Notons que malgré le changement de définition de l'unité de courant électrique, les découvertes d'André-Marie Ampère restent toujours au cœur de la métrologie : la balance de Kibble qui réalise le kilogramme à partir de la constante de Planck exploite les lois électrodynamiques, l'exactitude exceptionnelle des comparateurs cryogéniques de courant repose sur une application « parfaite » du théorème d'Ampère.

## Références :

- [1] Système métrique. [Adoption du système métrique décimal Gouvernement.fr](#).
- [2] Histoire des unités. Réseau national de la métrologie française. [L'histoire des unités | Réseau National de la Métrologie Française \(lne.fr\)](#).
- [3] La convention du mètre. [Convention du Mètre - BIPM](#).
- [4] Comptes Rendus des séances de la première Conférence Générale des Poids et Mesures, Paris, 1889. [Publications - BIPM](#).
- [5] Site internet « Ampère et l'histoire de l'électricité ». <http://www.ampere.cnrs.fr/>.
- [6] Procès-verbal de la séance de l'académie des Sciences du 25 septembre 1820.
- [7] M. A. Kastler, Ampère et les lois de l'électrodynamique. In. Revue d'histoire des sciences, tome 30, n°2, pp. 143, 1977.
- [8] Comptes Rendus des travaux du Congrès International des Electriciens, Paris, 1881, eds G. Masson, Paris 1882.
- [9] Comptes Rendus des séances de la cinquième Conférence générale des Poids et Mesures, Paris, 1913. [Publications - BIPM](#)
- [10] Comptes Rendus des séances de la septième Conférence générale des Poids et Mesures, Paris, 1927. [Publications - BIPM](#)
- [11] Comptes Rendus des séances de la neuvième Conférence générale des Poids et Mesures, Paris, 1948. [Publications - BIPM](#)
- [12] Comptes Rendus des séances de la onzième Conférence générale des Poids et Mesures, Paris, 1960. [Publications - BIPM](#)
- [13] Le système International d'unités (SI). [Système international d'unités \(SI\) - BIPM](#)
- [14] P. Vigoureux, A determination of the ampere, Metrologia 1, 3. (1965)
- [15] G. Trapon, O. Thévenot, J. Lacueille, W. Poirier, Metrologia 40, 159 (2003).
- [16] W. Poirier, S. Djordjevic, F. Schopfer and O. Thévenot, C. R. Phys.,20, 92 (2019).
- [17] K. von Klitzing, G. Dorda, M. Pepper, Phys. Rev. Lett. 45, 494 (1980).
- [18] B. Josephson, Phys. Lett. 1, 251 (1962).
- [19] S. Shapiro, Phys. Rev. Lett. 11, 80 (1963).
- [20] W. Poirier, F. Schopfer, Eur. Phys. J. Spec. Top. 172 , 207 (2009).
- [21] Comparaison BIPM.EM.K12. [Comparison Display \(bipm.org\)](#)

- [22] Comparaison BIPM.EM.K10b. [Comparison Display \(bipm.org\)](http://bipm.org)
- [23] L. Julien et al, *Reflète phys.* N° 62, 11 (2019).
- [24] B. Kibble, vol. 5, Plenum Press, 545 (1976).
- [25] Comptes Rendus des séances de la vingt-sixième Conférence générale des Poids et Mesures, Paris, 2018. [Publications - BIPM](#)
- [26] Le Système international d'unités (SI), 9<sup>ème</sup> édition, BIPM. [Brochure sur le SI - BIPM.](#)
- [27] S. Bauer, R. Behr, T. Hagen, O. Kieler, J. Lee, L. Palafox, J. Schurr, *Metrologia* 54, 152 (2017).
- [28] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov, *Science* 306, 666 (2004).
- [29] R. Ribeiro-Palau, F. Lafont, J. Brun-Picard, D. Kazazis, A. Michon, F. Cheynis, O. Couturaud, C. Consejo, B. Jouault, W. Poirier, F. Schopfer, *Nat. Nanotechnol.* 10, 965 (2015).
- [30] J.P. Pekola, O.P. Saira, V. Maisi, A. Kemppinen, M. Möttönen, Y.A. Pashkin, D. Averin, *Rev. Mod. Phys.* 85 1421 (2013).
- [31] H. Scherer, B. Camarota, *Meas. Sci. Technol.* 23, 124010 (2012).
- [32] S.P. Giblin, M. Kataoka, J.D. Fletcher, P. See, T.J.B.M. Janssen, J.P. Griffiths, G.A.C. Jones, I. Farrer, D.A. Ritchie, *Nat. Commun.* 3, 930 (2012).
- [33] W. Poirier, F. Lafont, S. Djordjevic, F. Schopfer, L. Devoille, *J. Appl. Phys.* 115, 044509 (2014)
- [34] J. Brun-Picard, S. Djordjevic, D. Leprat, F. Schopfer, W. Poirier, *Phys. Rev. X* 6, 041051 (2016).
- [35] M. Thomas, D. Ziane, P. Pinot, R. Karcher, A. Imanaliev, F.P.D. Santos, S. Merlet, F. Piquemal, P. Espel, *Metrologia* 54(4), 468 (2017).
- [36] J. Qu, S.P. Benz, K. Coakley, H. Rogalla, W.L. Tew, R. White, K. Zhou, Z. Zhou, *Metrologia* 54(4), 549 (2017).
- [37] Projet EMPIR SEQUOIA: Single-electron quantum optics for quantum-enhanced measurements. [SEQUOIA - Project \(ptb.de\)](#)