

L'unité ampère: de l'électrodynamique à la mécanique quantique

Wilfrid Poirier
Laboratoire national
de métrologie et d'essais

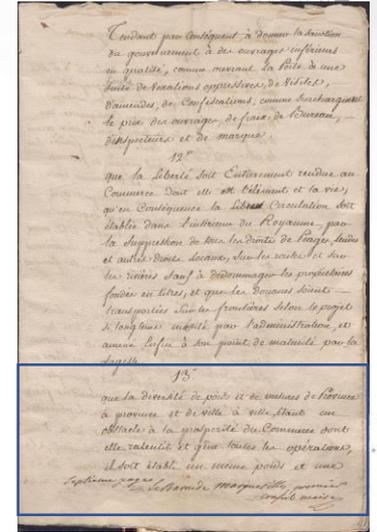


La métrologie moderne



1789 : la révolution française propose un idéal universel

Une des doléances: « un roi, une langue, un poids, une mesure »



Cahier de doléances de Nîmes sur lequel figure la demande d'uniformisation des poids et mesures (1789). Arch. dép. du Gard : C 1196.



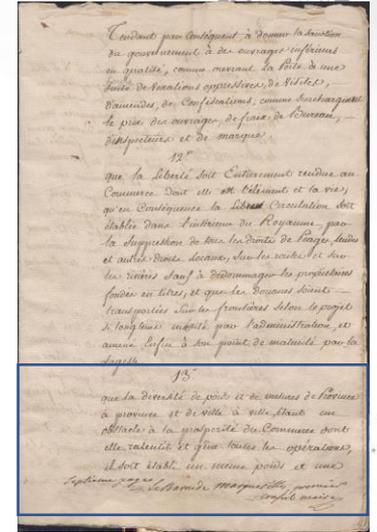
La métrologie moderne



1789 : la révolution française propose un idéal universel

Une des doléances: « un roi, une langue, un poids, une mesure »

Il existait plus de 800 mesures en usage en France : perche, toise, pied, pouce, aune, muid, setier, boisseau, pinte, livre, once, grain, cannes, etc.



Cahier de doléances de Nîmes sur lequel figure la demande d'uniformisation des poids et mesures (1789). Arch. dép. du Gard : C 1196.



Appel à un modèle « universaliste » des unités....



La métrologie moderne



1793: Adoption du système métrique en France, sous l'impulsion de l'académie des sciences: Lagrange, Laplace, Monge, mais aussi Borda et Lavoisier...

Le mètre est l'unité de longueur: « la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre »

La métrologie moderne



1793: Adoption du système métrique en France, sous l'impulsion de l'académie des sciences: Lagrange, Laplace, Monge, mais aussi Borda et Lavoisier...

Le mètre est l'unité de longueur: « la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre »

TABLEAU du nouveau système des poids et mesures et de leurs dénominations, annexé au décret de la Convention nationale du 1^{er} août 1793, l'an 2 de la République.

MESURES LINÉAIRES		MESURES DE SUPERFICIE		POIDS	
<i>Unité prise dans la nature.</i>		Unité des mesures de superficie agraires.		<i>Poids du mètre cubique d'eau.</i>	
Valeurs en toises et en pieds de Paris		<i>Carré dont le côté est de 100 mètres.</i>		Valeurs en livres poids de marc.	
		Valeurs rapportées au mètre.		Livres.	
		Mètres carrés.		Pieds carrés.	
		1. Are.....		1.000. Bar ou millier.....	
		10.000		2.044,4	
		94.831		100. Décibar.....	
		204,44		10. Centibar.....	
		20,444			
		<i>Rectangle dont un des côtés est de 100 mètres, et l'autre de 10 mètres.</i>		Unité des poids.	
		<i>Carré dont le côté est de 10 mètres.</i>		<i>Poids du décimètre cubique d'eau.</i>	
		Valeurs rapportées au mètre.		Onces. Gros. Grains.	
		Mètres carrés.		1. Grave.....	
		1.000		» 3 49	
		9.483,1		1/10. Décigrave.....	
		948,31		3 2 12,1	
		94,831		1/100. Centigrave.....	
		9,4831		2 44,41	
		9,4831			
		<i>NOTA. — L'are ayant pour côté 100 mètres ou 307 pieds 11 pouces 4 lignes, contient 94.831 pieds carrés. Le grand arpent qui est de 100 perches carrées, chaque perche étant de 22 pieds, contient 48.400 pieds carrés. D'où l'on trouve que l'are est à l'arpent à très peu près dans le rapport de 49 à 25.</i>		<i>Poids du centimètre cubique d'eau.</i>	
		1.000		1/1.000. Gravet.....	
		100		18,841	
		948,31		1/10.000. Décigravet.....	
		94,831		1,8841	
		9,4831		1/100.000. Centigravet.....	
		9,4831		0,18841	

La métrologie moderne



1793: Adoption du système métrique en France, sous l'impulsion de l'académie des sciences: Lagrange, Laplace, Monge, mais aussi Borda et Lavoisier...

Le mètre est l'unité de longueur: « la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre »

De 1792 à 1799, Delambre et Méchain étalonnent la « toise du Pérou » par des mesures de triangulation de Dunkerque (France) à Barcelone (Espagne) »

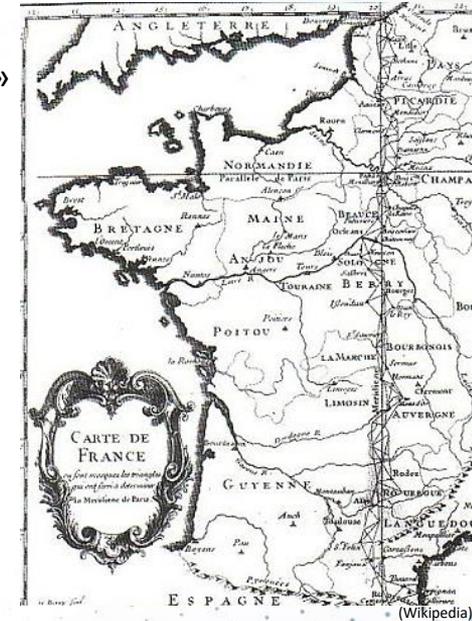


Delambre



Méchain

(Bureau des longitudes)



(Wikipedia)

1799: Adoption des étalons de longueur et de poids



Mètre des Archives

(Archives nationales AE/I/23/10)

La métrologie moderne



Pavillon de Breteuil (BIPM)

1875: La convention du mètre est signée par 18 pays: internationalisation
Création du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) pour conserver les étalons internationaux de masse et de longueur.

1889: Première Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

Adoption à « l'unanimité » des nouvelles définitions des unités de masse et de longueur, matérialisées par des étalons (prototypes, artéfacts)

Le grand K



Archives BIPM

Le mètre étalon



NIST

La définition mentionne la température de la glace fondante

L'électricité: de nouvelles grandeurs physiques



L'électricité dans la nature



S. Lebrigand (wikipedia)

La foudre

La charge électrique



A. Lerille (wikipedia)

Balance de Coulomb (1785)

Le magnétisme



(wikipedia)

Boussole 206 av. J.-C. à 220 apr. J.-C.

La tension électrique

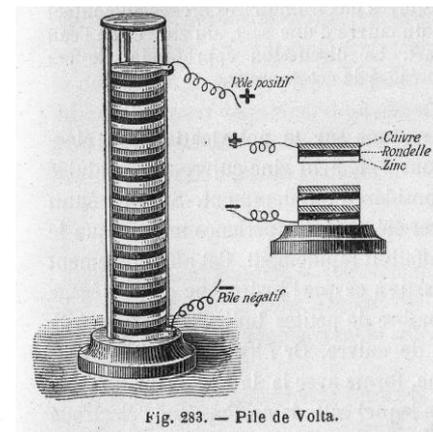


Fig. 283. — Pile de Volta.

Gillard(wikipedia commons)

Pile de Volta (1800)

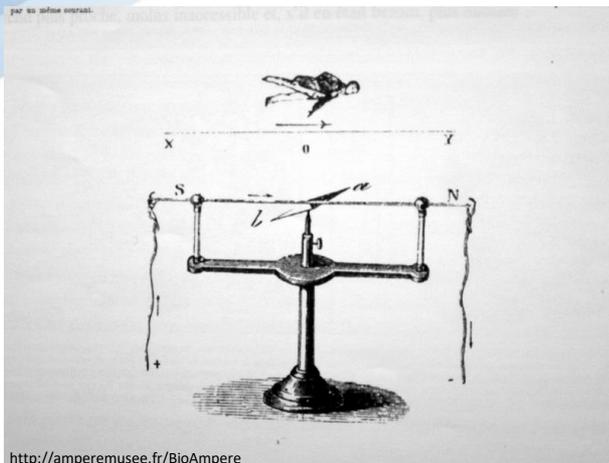
L'électricité: le courant électrique (André-Marie Ampère)



SÉANCE DU LUNDI 25 SEPTEMBRE 1820.

36

Relation entre électricité et magnétisme



Expérience d'Oersted reproduite par André-Marie Ampère (1820)

A laquelle ont assisté MM. de Lalande, Burckardt, Coquebert-Montbret, Laplace, Ramond, Arago, le Comte de Lacepède, Desfontaines, de Lamarck, Latreille, Lelièvre, Charles, Girard, Buache, du Petit Thouars, Thouin, Berthollet, Silvestre, Huzard, Legendre, Lacroix, Ampère, Labillardière, Mathieu, Rossel, Pelletan, Yvart, Portal, Cauchy, Cuvier, Duménil, Delambre, Prony, Sané, Sage.

Le procès verbal de la précédente Séance est lu et adopté.

S. Ex. le Ministre de l'Intérieur envoie le 3^e volume de la *Description des machines et procédés spécifiés dans les brevets d'invention de perfectionnement et d'importation dont la durée est expirée*, par M. Christian, Directeur du Conservatoire Royal des Arts et Métiers. Ce 3^e volume sera réuni aux deux précédents.

L'Académie reçoit un volume de Mémoires, écrits en italien, avec le titre d'*Opusculi scientifici*, adressé à l'Académie des Sciences, par M. Camille Ranzani, au nom des Éditeurs.

Un volume d'*Opusculi littéraires* est renvoyé à l'Académie des Inscriptions et Belles Lettres à laquelle il est adressé par les auteurs.

Notice sur le *Commerce des Anciens et des Modernes*, par M. Bail, Membre de la Société Royale des Antiquaires de France, extrait de la *Revue encyclopédique*.

M. Arago communique une expérience qui ajoute un fait nouveau à ceux qui ont été observés par M. Ørstedt. Il parle d'expériences plus anciennes publiées dans un volume de l'Académie de Berlin, et qui paraissent avoir une grande analogie avec les faits remarqués par M. Ørstedt.

M. Ampère lit un Mémoire sur les *Effets produits sur l'aiguille magnétique par la pile voltaïque*, et qui fait suite au Mémoire lu dans la Séance précédente; il annonce un fait nouveau, celui de l'action mutuelle de deux courants électriques sans l'intermède d'aucun aimant. Il fait des expériences pour prouver ce fait, et elles remplissent le reste de la Séance.

La Séance est levée.

Signé: Delambre.

Le courant électrique et les lois électrodynamiques
(forces entre conducteurs parcourus par des courants électriques)

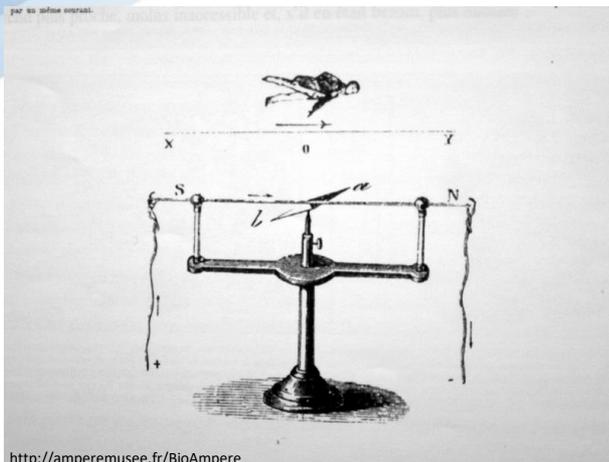
« L'unité ampère: de l'électrodynamique à la mécanique quantique » Wilfrid Poirier, LNE

L'électricité: le courant électrique (André-Marie Ampère)



SÉANCE DU LUNDI 25 SEPTEMBRE 1820.

Relation entre électricité et magnétisme



Expérience d'Oersted reproduite par André-Marie Ampère (1820)

36

M. Arago communique une expérience qui ajoute un fait nouveau à ceux qui ont été observés par M. Oerstedt. Il parle d'expériences plus anciennes publiées dans un volume de l'Académie de Berlin, et qui paraissent avoir une grande analogie avec les faits remarqués par M. Oerstedt.

M. Ampère lit un Mémoire sur les *Effets produits sur l'aiguille magnétique par la pile voltaïque*, et qui fait suite au Mémoire lu dans la Séance précédente; il annonce un fait nouveau, celui de l'action mutuelle de deux courants électriques sans l'intermède d'aucun aimant. Il fait des expériences pour prouver ce fait, et elles remplissent le reste de la Séance.

(forces entre conducteurs parcourus par des courants électriques)

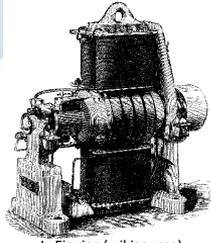
« L'unité ampère: de l'électrodynamique à la mécanique quantique » Wilfrid Poirier, LNE

XIX^{ème} siècle: la fée électricité

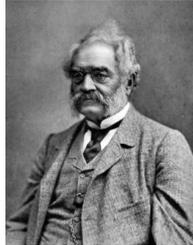


Essor industriel :le temps des ingénieurs, des inventeurs....

Dynamo électrique



L. Figuier (wikisource)



G. Brogi (wikipedia)

Werner von Siemens (1866)

Le moteur électrique synchrone



(wikipedia)

Nikola Tesla (1882)

Bellegarde
première ville française
éclairée à l'électricité (1884)
Ingénieur Louis Dumond

Le téléphone



(wikipedia)

Graham Bell (1876)

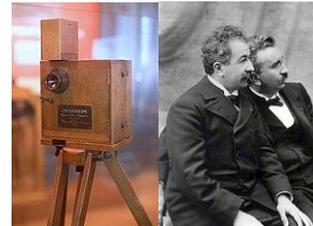
L'éclairage électrique



(wikipedia)

Ampoule d'Edison (1879)

Le cinématographe



(wikipedia)

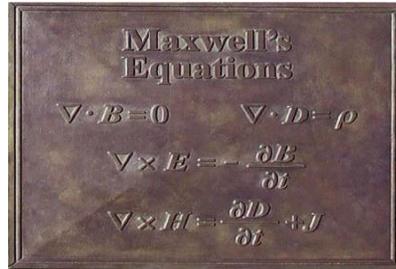
Les frères Lumière (1895)



Synthèse des propriétés électromagnétiques-Equations de Maxwell (1873)



(wikipedia)



$$B = \mu_0 H; D = \epsilon_0 E$$
$$\Delta E - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$
$$c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$$

Propriétés électromagnétiques du vide (μ_0, ϵ_0, c)

1881: Premier Congrès International des électriciens (Paris)

Première lignes du rapport du Congrès International des électriciens

AD. Cochery (ministre des postes et des télégraphes)

Monsieur le Président,

Des découvertes importantes et inattendues ont récemment appelé d'une façon particulière l'attention publique sur tout ce qui concerne l'électricité; en même temps l'industrie, s'emparant de ces conquêtes de la science, a depuis quelques années multiplié leurs applications dans toutes les branches; aujourd'hui aucune science ne semble devoir, plus que la science électrique, réaliser de rapides progrès, résoudre des problèmes intéressant la vie économique des nations, et rendre enfin à toutes nos relations d'inappréciables services.

Une unité électrique: l'ampère



1881: Congrès International des Electriciens (Paris)

Sir William Thomson, Werner von Siemens, Mascart, Lord Rayleigh, Becquerel, Fizeau, Helmholtz, Kirchhoff....

Des **scientifiques** qui désirent un système d'unités proches de la science

et des **ingénieurs** qui veulent des étalons pratiques

Décision: un compromis

on garde un système d'unités théorique C.G.S (centimètres, gramme, seconde), développé par Gauss et Weber, et on définit des étalons pratiques (l'ohm est défini par la résistance d'une colonne de mercure)

1° On adoptera pour les mesures électriques les unités fondamentales : centimètre, masse du gramme, seconde (C. G. S.);

2° Les unités pratiques, l'*Ohm* et le *Volt*, conserveront leurs définitions actuelles : 10^9 pour l'ohm et 10^8 pour le volt;

3° L'unité de résistance (ohm) sera représentée par une colonne de mercure d'un millimètre carré de section à la température de zéro degré centigrade;

4° Une Commission internationale sera chargée de déterminer, par de nouvelles expériences, pour la pratique, la longueur de la colonne de mercure d'un millimètre carré de section à la température de zéro degré centigrade qui représentera la valeur de l'ohm.

A ces quatre premières résolutions ont été ajoutées les trois propositions suivantes :

5° On appelle *Ampère* le courant produit par un volt dans un ohm;

6° On appelle *Coulomb* la quantité d'électricité définie par la condition qu'un ampère donne un coulomb par seconde;

7° On appelle *Farad* la capacité définie par la condition qu'un coulomb dans un farad, donne un volt.

Une unité électrique: l'ampère



1881: Congrès International des Electriciens (Paris)

Sir William Thomson, Werner von Siemens, Mascart, Lord Rayleigh, Becquerel, Fizeau, Helmholtz, Kirchhoff....

Des **scientifiques** qui désirent un système d'unités proches de la science

et des **ingénieurs** qui veulent des étalons pratiques

1° On adoptera pour les mesures électriques les unités fondamentales : centimètre, masse du gramme, seconde (C. G. S.);

2° Les unités pratiques, l'*Ohm* et le *Volt*, conserveront leurs définitions actuelles : 10^9 pour l'ohm et 10^8 pour le volt;

3° L'unité de résistance (ohm) sera représentée par une colonne de mercure d'un millimètre carré de section à la température de zéro degré centigrade;

4° Une Commission internationale sera chargée de déterminer, par de nouvelles expériences, pour la pratique, la longueur de la colonne de mercure d'un millimètre carré de section à la température de zéro degré centigrade qui représentera la valeur de l'ohm.

A ces quatre premières résolutions ont été ajoutées les trois proposi-

5° On appelle *Ampère* le courant produit par un volt dans un ohm;

(centimètres, gramme, seconde), développée par Gauss et Weber, et on définit des étalons pratiques (l'ohm est défini par la résistance d'une colonne de mercure)

6° On appelle *Coulomb* la quantité d'électricité définie par la condition qu'un ampère donne un coulomb par seconde;

7° On appelle *Farad* la capacité définie par la condition qu'un coulomb dans un farad, donne un volt.

Une unité électrique: l'ampère



1881: Congrès International des Electriciens (Paris)

sir William Thomson (Lord Kelvin) est choisi pour expliquer le sens du système d'unités et justifier les noms des unités choisies

Unités C.G.S

en unités fondées sur les unités fondamentales choisies. Mais ces unités ne seraient pas commodes pour la pratique, quelques-unes étant trop petites, quelques autres trop grandes, et c'est en multipliant, c'est en prenant pour mesure pratique de résistance une résistance qui est représentée dans le système absolu par une vitesse de 1,000 millions de centimètres par seconde, que l'on obtient l'ohm que la Commission propose au Congrès de maintenir; de même le volt correspond à 100 millions d'unités C. G. S. de force électromotrice.

« Mais sous cette forme, dans cette définition, ces unités n'existent que dans les conceptions des géomètres et des physiciens. Il a paru nécessaire d'en avoir des représentations concrètes, et, dans ce sens, il a paru préférable de recourir à une définition par une colonne de mercure répondant à certaines conditions géométriques.

L'ohm est défini par la résistance d'une colonne de mercure

Rapport du Congrès International des électriciens

« Il existe d'autres quantités électriques dont la mesure est souvent négligée dans la pratique, parce que l'on manque de noms pour les désigner 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. Ainsi le volt (unité de force électromotrice) agissant dans un ohm (unité de résistance) donne un courant de un ampère, c'est-à-dire de un coulomb (unité de quantité) par seconde; et le farad est la capacité d'un condensateur qui contient un coulomb, quand la différence de potentiel entre ses deux plaques est un volt. »

Une unité électrique: l'ampère



1881: Congrès International des Electriciens (Paris)

sir William Thomson (Lord Kelvin) est choisi pour expliquer le sens du système d'unités et justifier les noms des unités choisis

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

Une unité électrique: l'ampère



1889: 1^{ère} Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM): système M.K et les unités électriques ne sont pas traitées

1913: 5^{ème} CGPM : système M.K.S, l'unité d'intensité de courant est l'Ampère international

L' Ampère international est le 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.**

Une seule unité électrique de base: l'Ohm international (toujours définie à partir d'une colonne de mercure).

1927: Le BIPM est chargé de conserver les étalons électriques et de réaliser les comparaisons avec les étalon nationaux

1933: Volonté de substituer des unités électriques absolues (du type C.G.S) aux unités dites internationales

1948: Adoption du Système M.K.S.A (travaux de Giorgi) : **l'ampère devient l'unité de base**

1960: Adoption du Système International d'unités (SI) fondé sur sept unités de base, dont l'ampère

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



Physique des lasers

$c=299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1983)

mètre (m)

Physique des matériaux

kilogramme (kg)

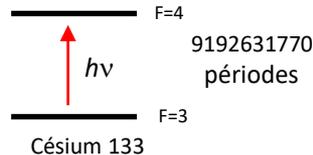
(1889)



Seconde (s)

(1967)

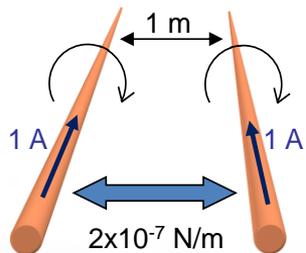
Physique atomique



Ampère (A)

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$$



1948: 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 2×10^{-7} newton par mètre de longueur.

Electromagnétisme

Electrodynamique
La force d'Ampère



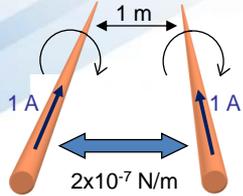
Première définition fondée sur la fixation d'une constante de la nature

Les unités électriques sont définies à partir des unités mécaniques, donc réalisées à partir d'expériences électromécaniques

Réalisation des unités électriques



Ampère (μ_0)



Balance de l'ampère



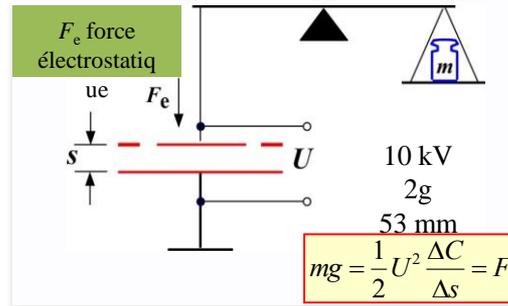
LNE

Comparaison de la force exercée entre deux bobines concentriques traversées par un courant et le poids d'une masse

Incertitude
 $u = \text{qqs. } 10^{-6}$ (1960)

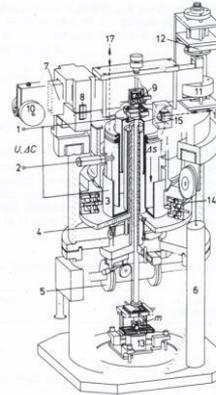
Volt (ϵ_0)

Balance du volt



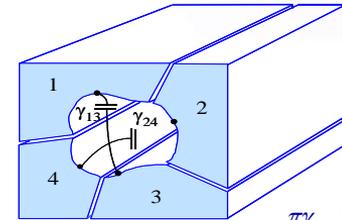
T. Funk et al, *IEEE TIM* (1991)

$u = 2-3 \times 10^{-7}$



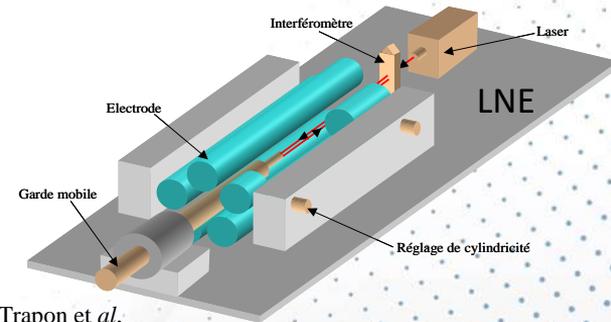
Farad (ϵ_0)

Etalon calculable de capacité de Thompson-Lampard (1956)



Théorème

$$\exp\left(-\frac{\pi\gamma_{13}}{\epsilon_0}\right) + \exp\left(-\frac{\pi\gamma_{24}}{\epsilon_0}\right) = 1$$



G. Trajon et al, *Metrologia* 40, 159 (2003)

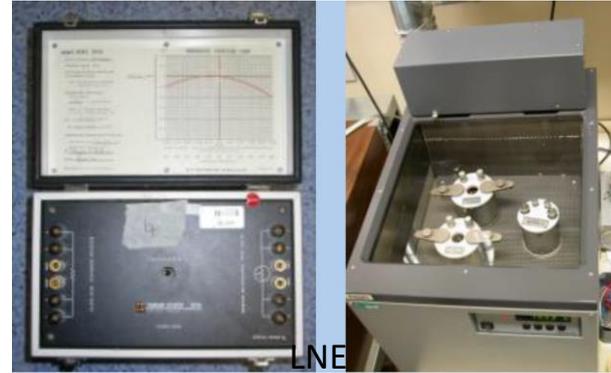
$u = 1-2 \times 10^{-8}$

Conservation des unités électriques

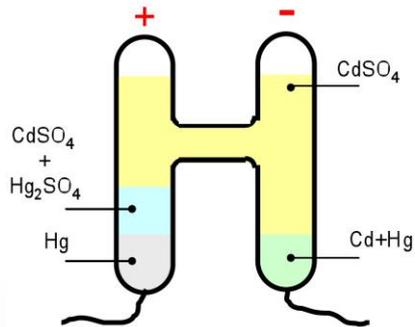


Base nationale de conservation de l'ohm

Un ensemble d'étalons
de résistance de 1Ω



Base nationale de conservation du volt



Piles Weston (1891): 1,01864 V à 20°C



Diodes Zener: 1 V, 10 V

Limitations: instabilité, dépendance en température, en pression, non déplaçable

La révolution quantique

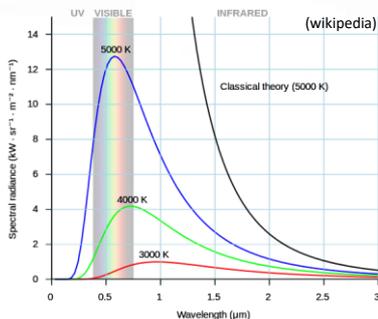


(wikipedia)
Max Planck

Densité spectrale d'énergie
du corps noir (1900)

$$U(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{(h\nu/kT)} - 1}$$

Quantum d'énergie $h\nu$
 $h \approx 6,62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$



(wikipedia)
Albert Einstein

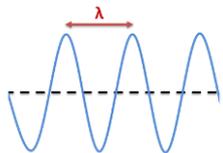
$h\nu$ est le quantum
d'énergie d'un photon
(1905)

Manifestation de la
dualité onde-particule



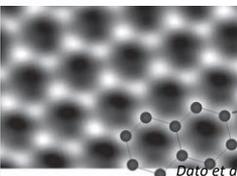
(wikipedia)
Louis de Broglie

Association d'une onde à
chaque particule (1924)



$$\lambda = \frac{h}{p}$$

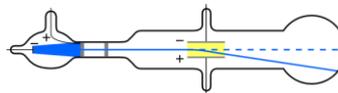
p : impulsion



Data Pet et al. 2009

$$\lambda = 1 \text{ \AA} \text{ (electron } v=c/50)$$

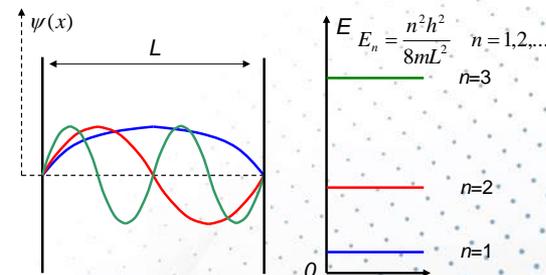
Découverte de
l'électron (1897)



(wikipedia)
Joseph John Thomson

Equation de Schrodinger (1925)

$$\mathcal{H}\psi(r, t) = i\hbar \frac{\partial \psi(r, t)}{\partial t}$$



Electron dans une boîte 1 nm (1D)

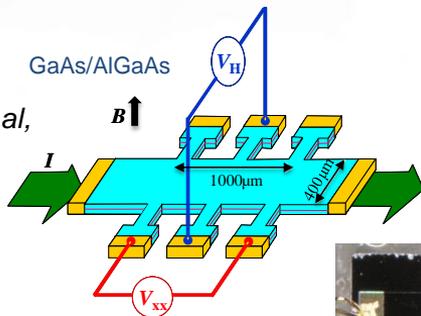
Les étalons quantiques de résistance et de tension



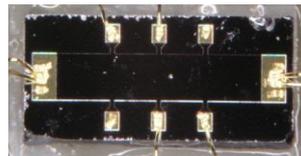
• Effet Hall quantique (Ω)



K. von Klitzing et al,
PRL (1980)



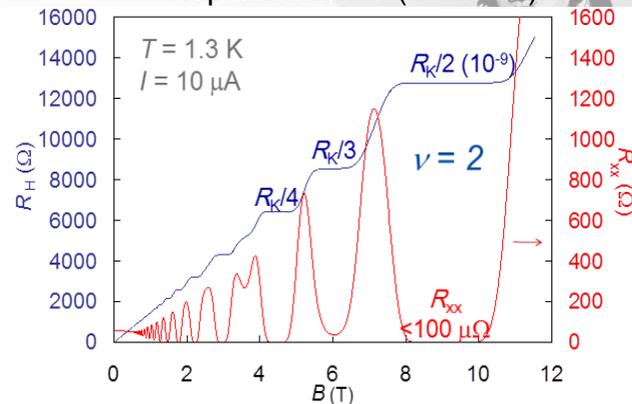
Gaz d'électrons 2D



$$R_H = R_K / i$$

$$R_K = h/e^2 \ (\sim 26 \text{ k}\Omega)$$

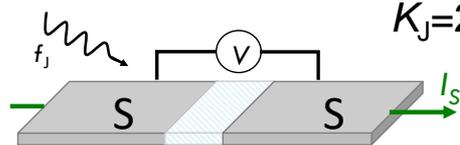
Reproductibilité ($u < 10^{-10}$)



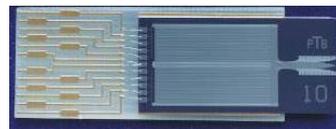
• Effect Josephson (V)



B. D. Josephson,
PRL (1962)



Jonction entre deux supraconducteurs irradiée par un signal radio-fréquence

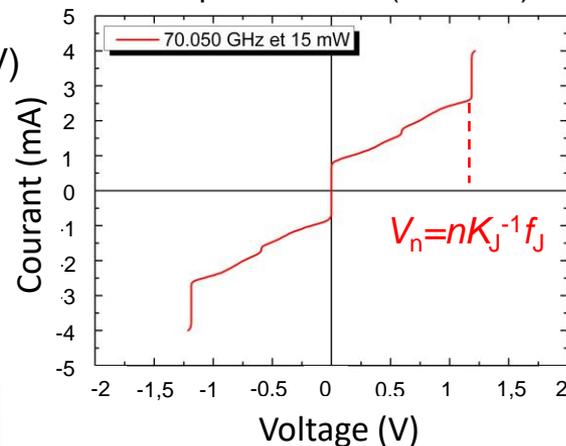


Réseau SINIS 8196 JJ (PTB)

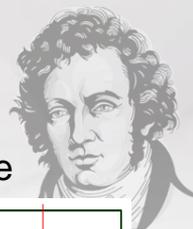
$$V_J = nK_J^{-1} f_J$$

$$K_J = 2e/h \ (\sim 0.5 \text{ GHz}/\mu\text{V})$$

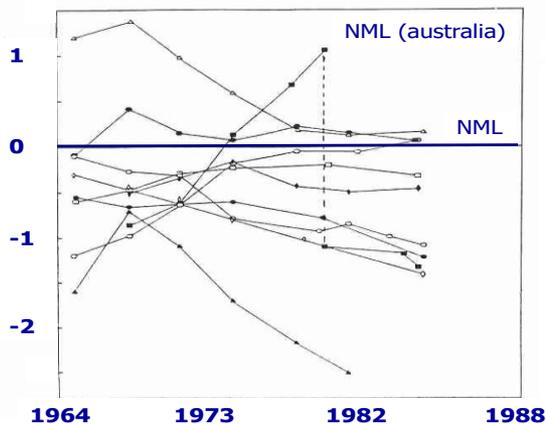
Reproductibilité ($u < 10^{-16}$)



Traçabilité des mesures de résistance et de tension



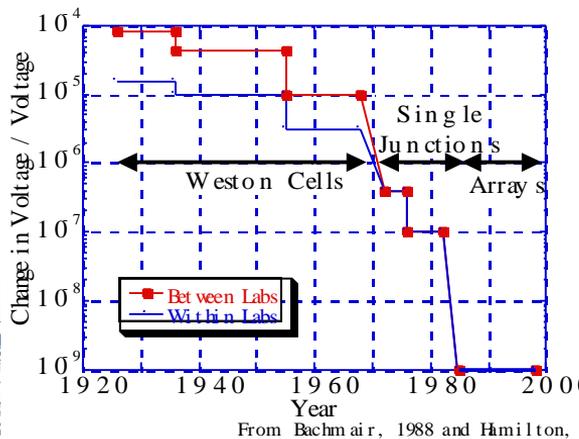
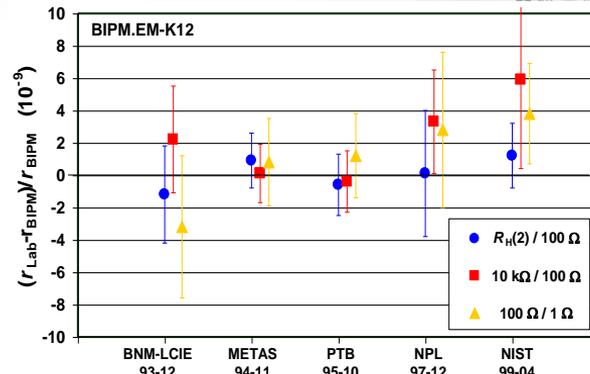
$\Omega_{LAB} - \Omega_{NIML} (\mu\Omega)$



Degré d'équivalence

$U \sim 10^{-6}$ \rightarrow $U \sim 10^{-9}$

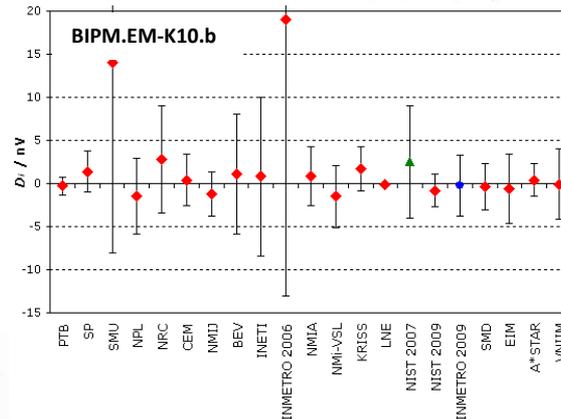
Effet Hall quantique



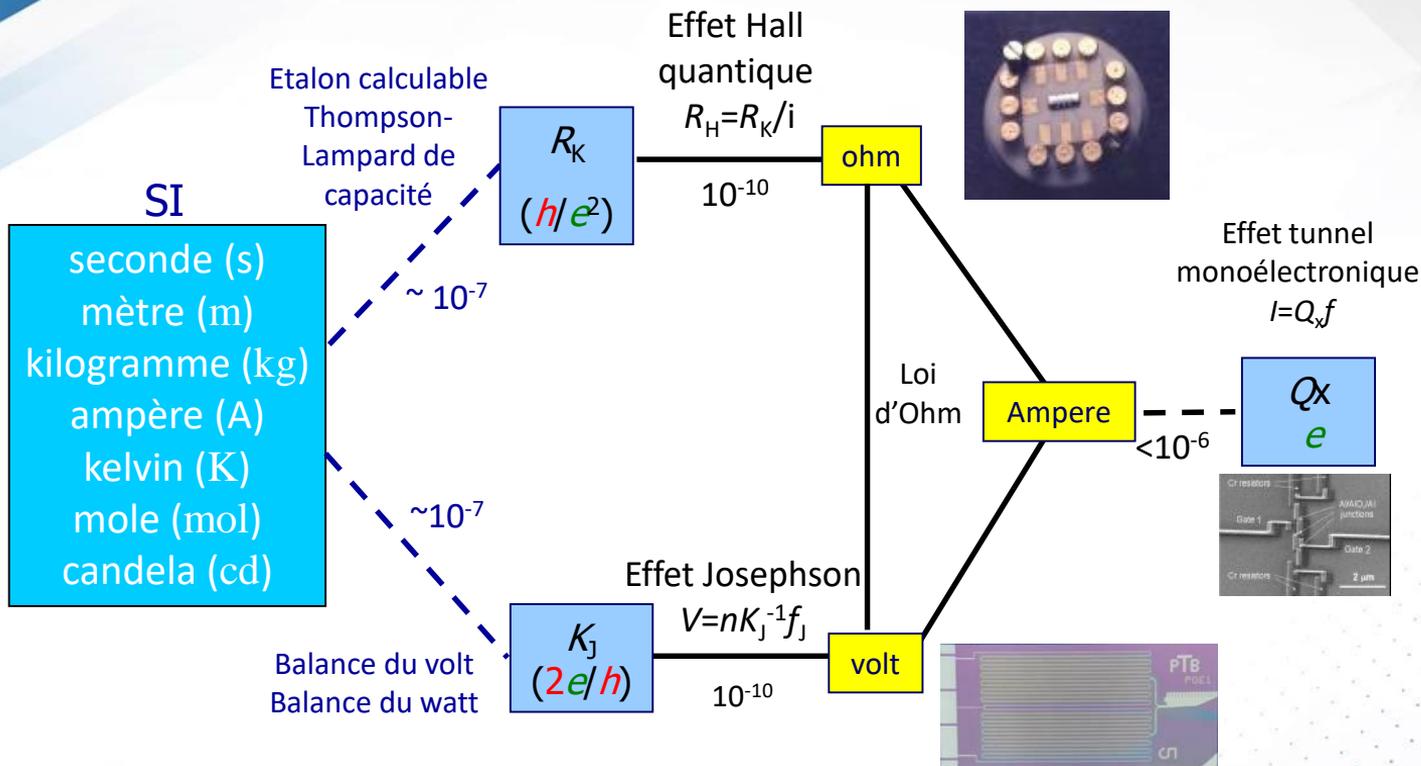
Degré d'équivalence

$U \sim 10^{-6}$ \rightarrow $U \sim 10^{-10}$

Effet Josephson



Limites de la définition électrodynamique de l'ampère



Constantes h et e apportent universalité et reproductibilité
Mais les définitions du SI « entachent » R_K and K_J de larges incertitudes

Un artifice pour les unités électriques (1990-2018)



Des valeurs conventionnelles sont adoptées pour R_K et K_J afin de bénéficier de la reproductibilité des effets quantiques:

$$R_{K-90} = 25812,807 \, \Omega, \quad K_{J-90} = 483597,9 \times 10^9 \, \text{HzV}^{-1}$$

Des Représentations (R_{K-90} , K_{J-90}) et non des Réalisations SI (R_K , K_J) des unités électriques:

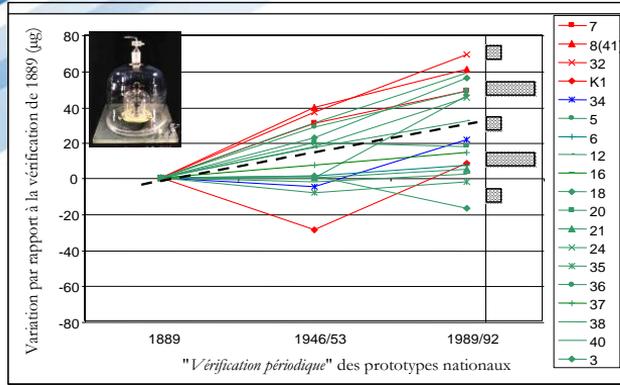
$$R_K = R_{K-90} \times (1 \pm 10^{-7})$$
$$K_J = K_{J-90} \times (1 \pm 4 \times 10^{-7})$$

- ⇒ Les représentations des unités électriques étaient universelles, mais hors SI!!!
- ⇒ Un des arguments pour réviser le Système International d'unités

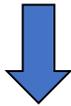
Une révision du SI: pourquoi?



Les limites intrinsèques du dernier artéfact



Dérive du Prototype International du Kilogramme 3.10^{-8} /siècle?



Réaliser le kilogramme à partir de h (balance du watt)



Les limites dans la réalisation du point triple de l'eau



Réaliser le kelvin à partir de la constante de Boltzmann k

Les limites liées à la définition de l'ampère



Réaliser les unités électriques à partir de h et e

- Mettre au point les réalisations des unités à partir de constantes de la nature
- Déterminer les constantes avec les meilleures incertitudes

$$h = 6.626070150 \times 10^{-34} (1 \pm 1.0 \times 10^{-8}) \text{ J.s}$$

$$e = 1.602176634 \times 10^{-19} (1 \pm 5.2 \times 10^{-9}) \text{ C}$$

- Théories quantiques confirmées

$$R_K = \frac{h}{e^2} (1 + \epsilon_K) \quad \epsilon_K = (2.2 \pm 1.8) \times 10^{-8}$$

$$K_J = \frac{2e}{h} (1 + \epsilon_J) \quad \epsilon_J = (-0.9 \pm 1.5) \times 10^{-8}$$

Une révision historique du SI: sept constantes fixées



16/11/2018, 26^{ème} CGPM, résolution 1



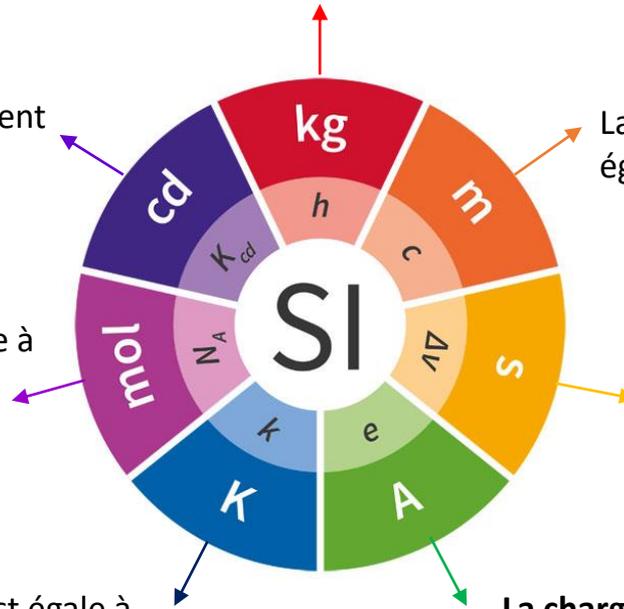
La constante de Planck, h , est égale à $6,62\ 607\ 015 \times 10^{-34}$ J.s (**kg.m².s⁻¹**)

Mécanique quantique

L'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{cd} , est égale à 683 lm/W (**cd.sr.kg⁻¹.m⁻².s³**)

La vitesse de la lumière dans le vide, c , est égale à $299\ 792\ 458$ m/s

La constante d'Avogadro, N_A , est égale à $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹



La fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{Cs}$, est égale à $9\ 192\ 631\ 770$ Hz (**s⁻¹**)

La constante de Boltzmann, k , est égale à 1380649×10^{-23} J/K

La charge élémentaire, e , est égale à $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C (**A.s**)

Physique statistique

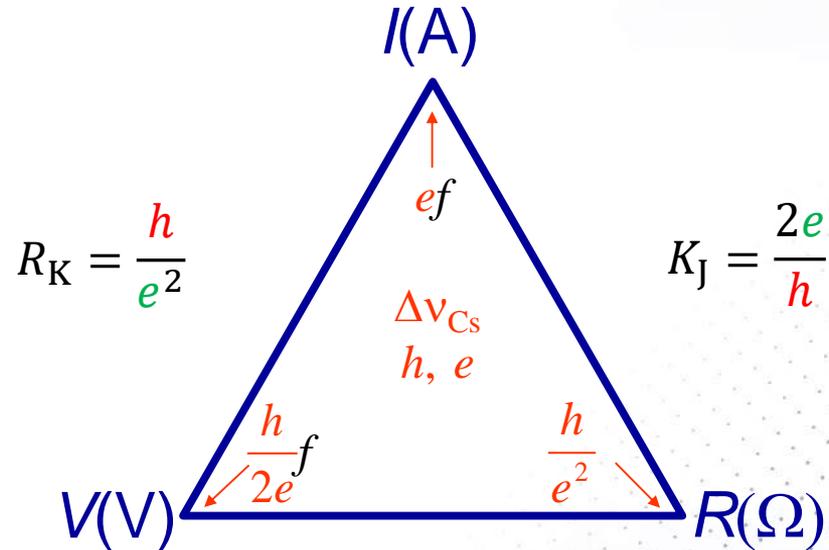
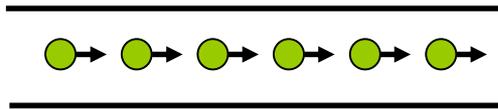


La définition de l'ampère fondée sur la charge élémentaire



Définition: 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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

$$I = ef$$



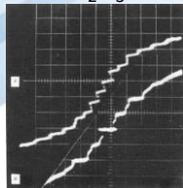
Les unités électriques sont définies à partir des constantes h et e ,
et ne sont plus asservies aux unités mécaniques





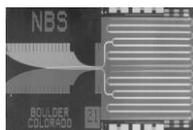
Le volt (Effet Josephson)

Al/Al₂O₃/Sn



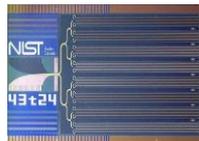
Shapiro steps 1963

Réseau 1 V
conventionnel



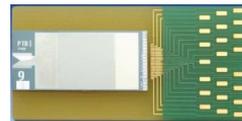
NIST/PTB 1984

Réseau 10 V
conventionnel



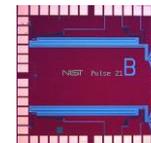
NIST 1992

Réseau 10 V
programmable



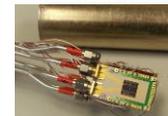
PTB 2000/2009

275 mV JAWS



NIST 2009

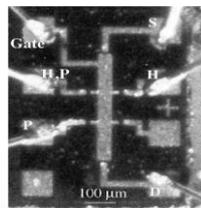
1V JAWS



PTB 2014

L'ohm (Effet Hall quantique)

MOSFET Si



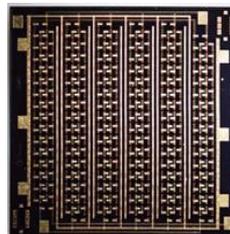
Klitzing 1980

GaAs/AlGaAs
Tsui and Gossard 1981



BNM 1991

Réseaux
 $R_K/100 \rightarrow 100 R_K$



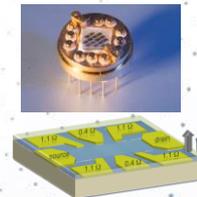
BNM/LNE 2002

AC QHE



PTB/METAS 2009

Graphene



NPL 2010, LNE 2015

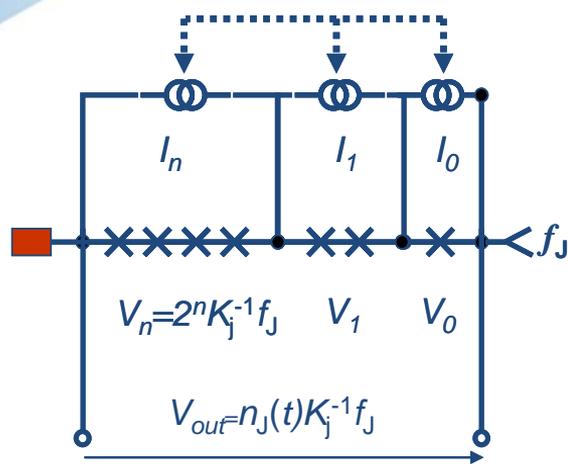
Les nanotechnologies au cœur des étalons quantiques



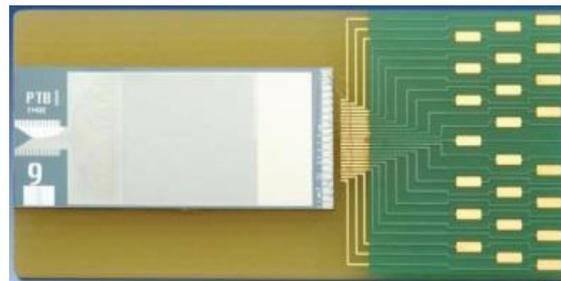
- Réseau Josephson programmable

Convertisseur numérique
analogique quantique

Ordinateur

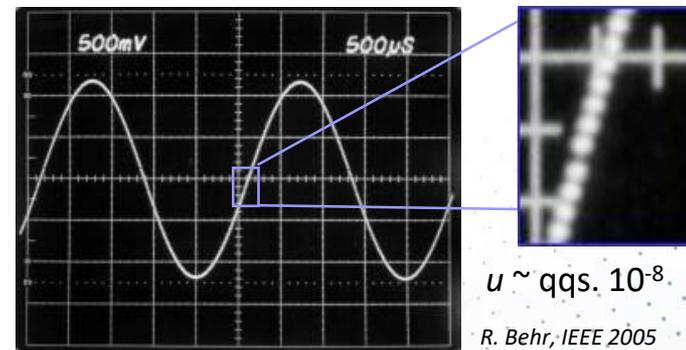


segments à nombre de jonctions
à croissance binaire



Réseau PTB 10 V
69632 jonctions
Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb (SNS)

Génération de signaux alternatifs (< 1 kHz)

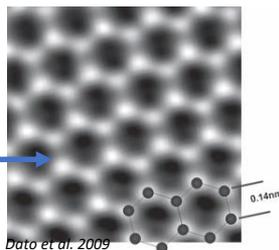
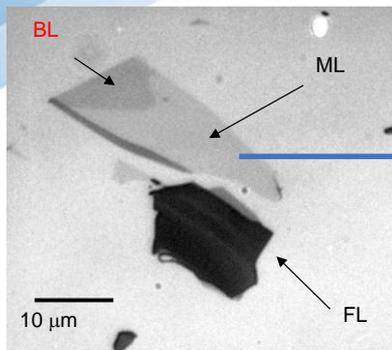


Les nouvelles découvertes au cœur des étalons quantiques

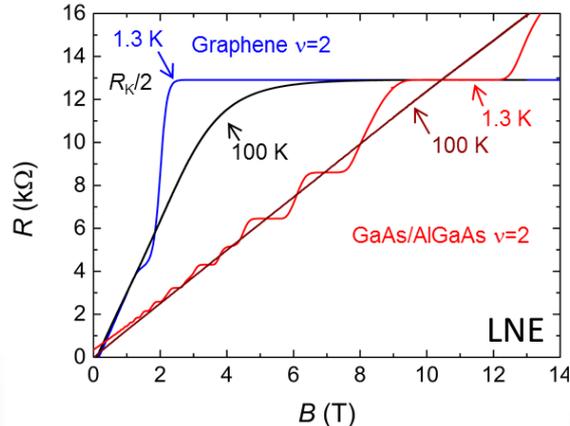


- Graphène

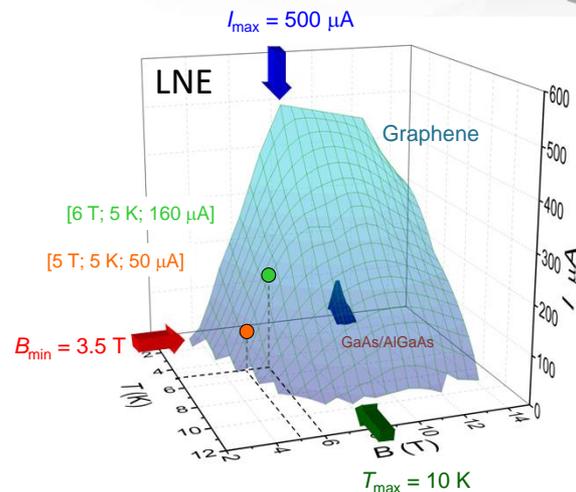
Monocouche d'atomes de carbone
(Geim&Novoselov 2004)



Graphène sur SiC (LNE/C2N/CHREA/L2C)



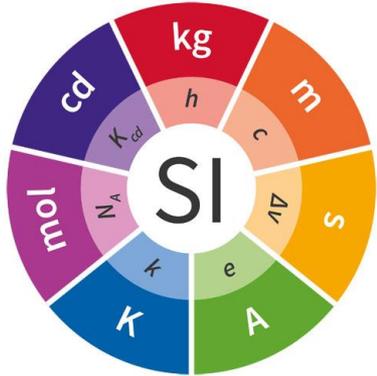
Quantification à 10^{-9} près: conditions expérimentales



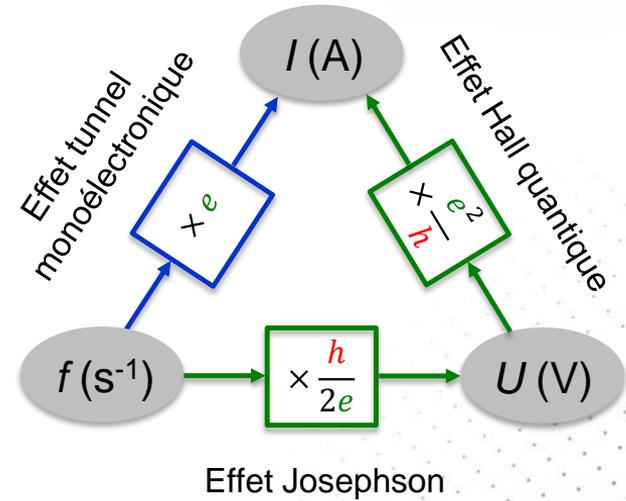
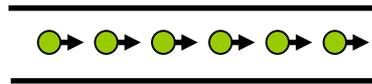
R. Ribeiro-Palau et al, *Nat. Nanotech.*, 9, 965 (2015)
W. Poirier et al, *C. R. Phys.*, 20, 92 (2019)

Vers un étalon plus robuste
et plus pratique

Et l'ampère!



$$I = ef$$



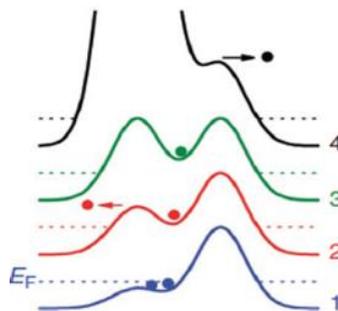
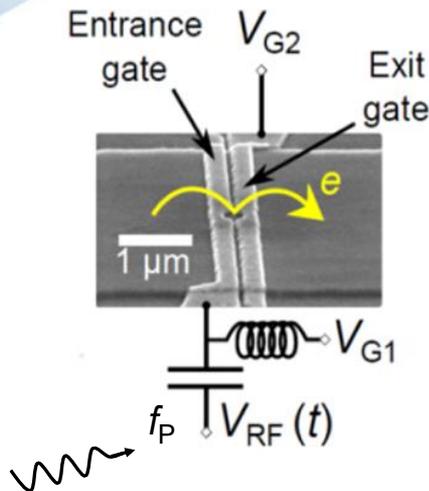
Et l'ampère : manipuler les électrons un par un!



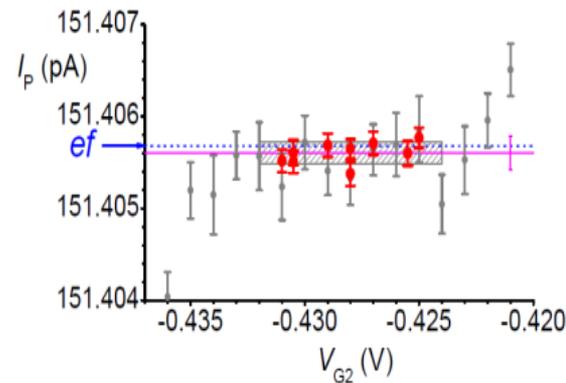
$$I = ef_p$$



Nano-système



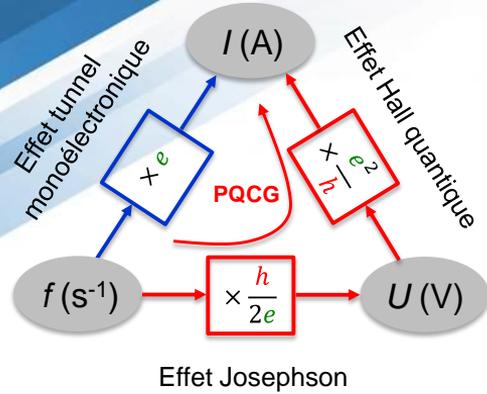
S. P. Giblin et al. Nature Com. 3, 930 (2012)



Incertitude relative: $2 \cdot 10^{-7}$
(petits courants, manque de reproductibilité)

« L'unité ampère: de l'électrodynamique à la mécanique quantique » Wilfrid Poirier, LNE

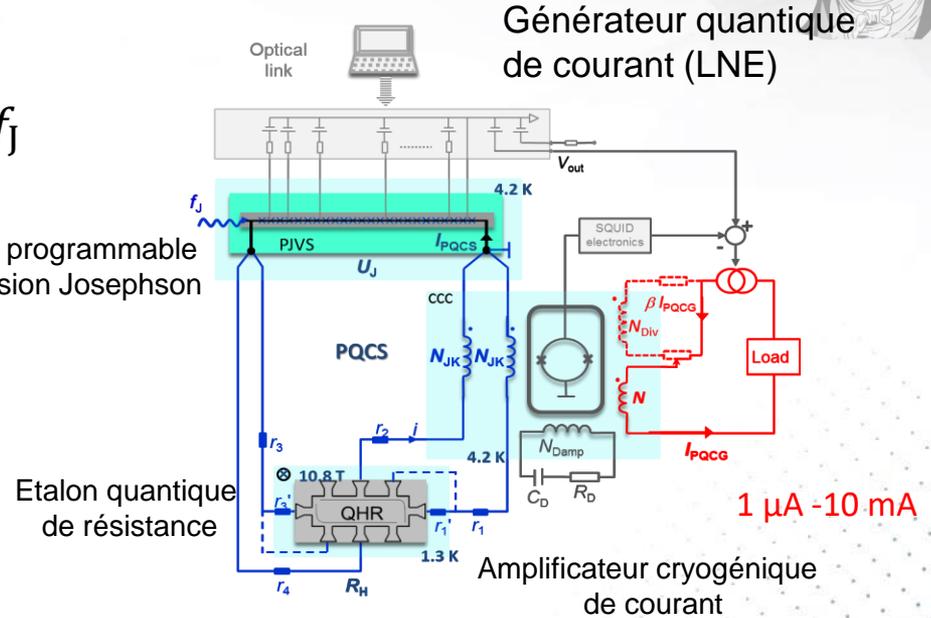
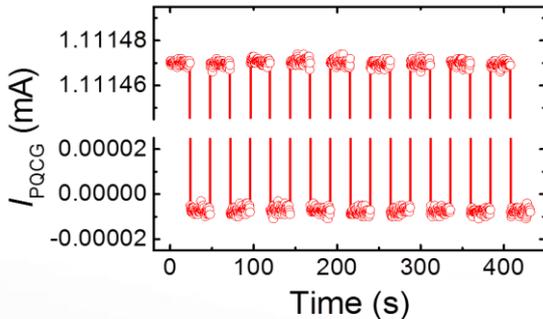
Et l'ampère : par la loi d'Ohm!



$$I = \frac{\left(\frac{h}{2e} f_J\right)}{\frac{h}{2e^2}} = e f_J$$

Etalon programmable de tension Josephson

Incertitude relative: 10^{-8}



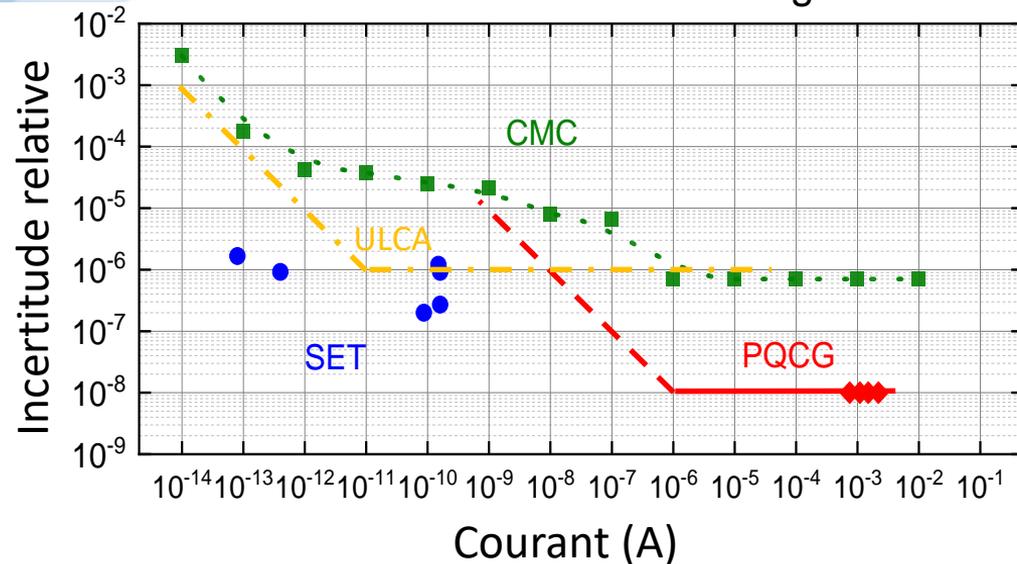
J. Brun-Picard et al, Phys. Rev. X 6, 041051 (2016)

« L'unité ampère: de l'électrodynamique à la mécanique quantique » Wilfrid Poirier, LNE

Une nouvelle métrologie pour l'ampère



Amélioration de deux ordres de grandeur



Vers une métrologie du courant aussi performante que celle de la résistance ou de la tension

W. Poirier et al, C. R. Phys.,20, 92 (2019)

Vers un calibrateur quantique

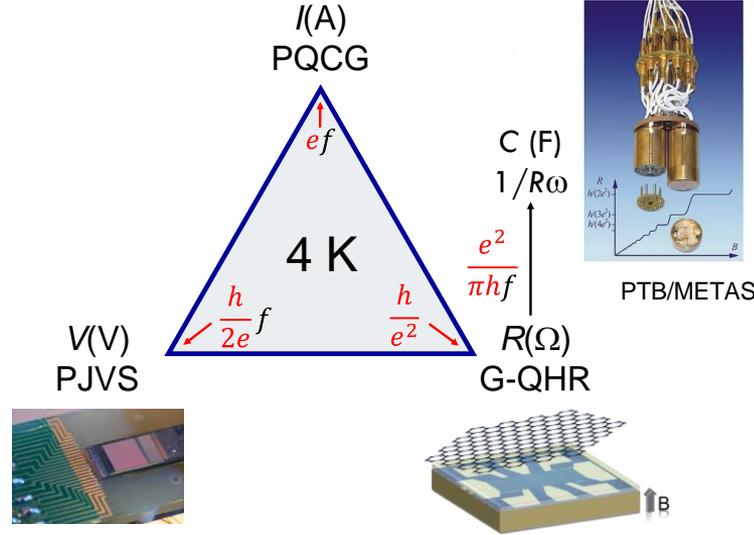


Combiner les étalons quantique de résistance et de tension dans un unique cryostat:

Le volt, l'ohm, l'ampère, le farad à partir des constantes h and e

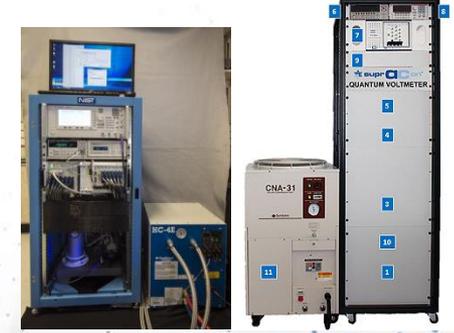


W. Poirier et al, C. R. Phys.,20, 92 (2019)



S. Bauer et al, Metrologia (2017)

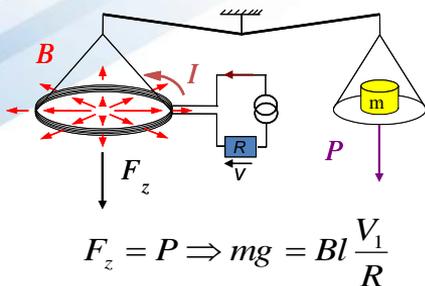
Etalons quantiques commerciaux 10 V pour des applications DC and AC



Le kilogramme « quantique »



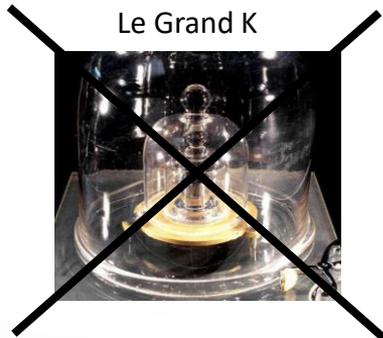
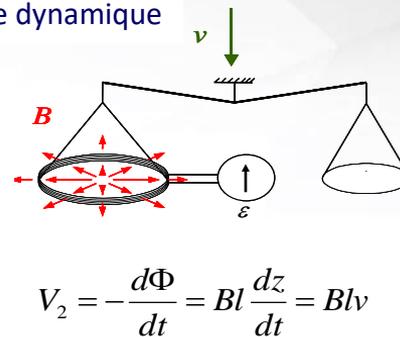
Phase statique



Comparaison des puissances
mécanique et électrique
(B. Kibble, Metrologia, 1976)

$$mgv = \frac{V_1 V_2}{R}$$

Phase dynamique



Effet Hall quantique et effet Josephson

$$m = \left(\frac{n_1 n_2 f_1 f_2 i}{gv} \right) \frac{1}{R_K K_J^2} = \left(\frac{n_1 n_2 f_1 f_2 i}{gv} \right) \frac{h}{4}$$



$u = 5.7 \times 10^{-8}$

M. Thomas et al,
Metrologia, 2017

Réalisation directe du kilogramme, kg, à partir de h

Les unités: un histoire sans fin!



- **Métrologie: un équilibre entre science et industrie**
 - Unités : des définitions « fondamentales », des réalisations « pratiques »
- **Une révision historique du SI**
 - Un système d'unités « fondamentales » intégrant la physique moderne au travers des constantes
 - Des définitions universelles qui ne restreignent pas les réalisations pratiques
 - **L'ampère est défini à partir de la charge élémentaire (la nature microscopique du courant reconnue)**
- **Des phénomènes quantiques au cœur du SI**
 - Réalisation de l'ohm, le volt, le farad et l'ampère à partir de h et e
 - Réalisation du kilogramme en utilisant la balance de Kibble
- **Une nouvelle ère s'ouvre pour la métrologie de l'ampère**
 - Un générateur quantique de courant, des instruments de mesure plus performants
 - Vers des détecteurs ultra-rapides de signaux électriques fondés sur des interféromètres à un électron

- **Les découvertes d'André-Marie Ampère toujours au cœur de la métrologie**
 - La balance de Kibble exploite les lois électrodynamiques
 - L'exactitude exceptionnelle (10^{-11}) des comparateurs cryogéniques de courant repose sur le théorème d'Ampère

Merci
de votre attention

