LA PHYSIQUE REVISITÉE

L'histoire compliquée des unités électriques : implications sur les expressions SI

Jean-Marc, Augustin ROUX[1]
[1]Professeur Agrégé

La physique revisitée, Numéro 1, pages 24-41
Publié le 03 09 2025
DOI : 10.5281/zenodo.20382336
Licence: CC BY 4.0 †

Cet article d'histoire des sciences accompagne l'article scientifique :
Résolution de l'incohérence des lois initiales de l'électromagnétisme, implications et perspectives

ABSTRACT: The International System of Units has only existed since 1946 and it was developed after a very long process that depended on the evolution of our understanding of electromagnetism.

This article aims to highlight the interconnections between mechanics and electromagnetism that have influenced the choice of units.

It is through a pedagogical approach to progress in understanding electrical phenomena that we will follow this construction of the system of units in general and of electrical units in particular.

it appears that the choice of electrical units was conditioned by the predominant use of the electromechanical measurement system based on magnetic force, CGS EMU, to the detriment of the measurement system based on electrostatic force, CGS ESU. These two systems were incompatible and had a ratio in the speed of light. Furthermore, the expressions for these forces failed to account for the solid angle 4π, which consequently appeared unjustifiably in Maxwell's equations; the rationalization proposed by Heaviside resolved this problem.

The article shows that this rationalization and incompatibility between these two systems necessitated, during their unification, the use of two constants to adjust the expressions for Ampère and Coulomb forces to the electrical units defined in the CGS UEM system. We call these constants the permeability and permittivity of free space.

keywords: EMU, ESU, International System of Units , CGS system

RÉSUMÉ : Le système international d'unités n'existe que depuis 1946 et il s'est élaboré après un très long processus qui a dépendu de l'évolution de notre compréhension de l'électromagnétisme.

Cet article vise à mettre en lumière les imbrications entre mécanique et électromagnétisme qui ont conditionnées les choix d'unités.

C'est par un cheminement pédagogique des progrès dans la compréhension des phénomènes électriques que l'on va suivre cette construction du système d'unités en général et des unités électriques en particulier.

Il apparait que les choix d'unités électriques ont été conditionnés par l'utilisation prépondérante du système de mesure électromécanique basé sur la force magnétique, le CGS UEM, au détriment du système de mesure basé sur la force électrostatique, le CGS UES. Ces deux systèmes étaient incompatibles et présentaient un rapport en vitesse lumière. D'autre part il manquait dans les expressions de ces forces la prise en compte de l'angle solide 4π qui en conséquence apparaissait de façon non justifiée dans les équations de Maxwell, la rationalisation voulue par Heaviside résolue ce problème.

L'article montre que cette rationalisation et cette incompatibilité entre ces deux systèmes a imposé, lors de leur unification, l'utilisation de deux constantes permettant d'ajuster les expressions des forces d'Ampère et Coulomb aux unités électriques qui avaient été définies dans le système CGS UEM. Nous appelons ces constantes perméabilité et permittivité du vide.

Mots clés : UEM , UES, système international d'unités, système CGS

1. PREMIÈRES DÉCOUVERTES

1.1. Année 1733

Charles DUFAY distingue deux espèces différentes d'électricité : électricité vitrée (charge positive) ou résineuse (charge négative) qui se repoussent quand elles sont identiques et s'attirent lorsqu'elles sont différentes.

Charles DUFAY est le premier à avoir une approche scientifique du phénomène électrique qui ne servait que d'amusement de salons jusque-là. Il a publié différents mémoires dans plusieurs domaines (géométrie, anatomie, chimie etc …).



Charles DUFAY

Né en 1698
Mort en 1739

1.2. Année 1750

Benjamin FRANKLIN développe la théorie du fluide électrique en « plus » ou « moins » (gain ou perte).

Il manque malheureusement à FRANKLIN la connaissance des travaux de DUFAY concernant les deux espèces d'électricité statique. « Plus » et « Moins » ne sont donc pas la nouvelle convention pour les désigner (sens qu'elle prendront plus tard). Ce sont des dénominations qui ont le sens de gain ou de perte d'électricité. La notion de courant affleure.



Benjamin FRANKLIN en 1778

Né en 1706
Mort en 1790

1.3. Année 1771

Henry CAVENDISH introduit la notion de « degré d'électrification » (potentiel).

Avec CAVENDISH les notions de charges, de potentiels et même de résistances deviennent plus claires. Il est de ce fait le précurseur de la loi d'Ohm.

Hors du domaine électrique, Il sera le premier à avoir mesuré la constante de gravitation ainsi que la densité de la terre en 1798 en s'inspirant de la méthode utilisée par COULOMB pour les charges électriques.



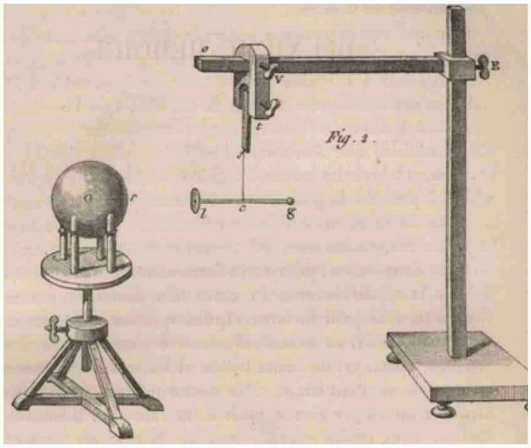
Henry CAVENDISH

Né en 1731
Mort en 1810

1.4. Année 1785

Charles COULOMB établi la loi qui donne la force d'interaction en $1/d^2$ entre deux charges (première formulation dimensionnelle d'un phénomène électromécanique) :

"La force répulsive de deux petits globes électrisés de la même nature d'électricité est en raison inverse du carré de la distance du centre des deux globes"



Mesure de la force électrique

Charles COULOMB

Né en 1736
Mort en 1806



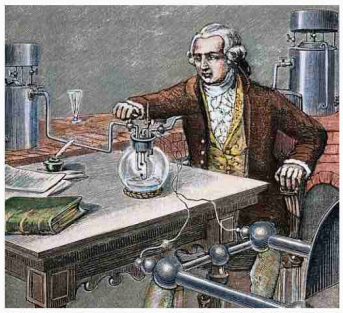
Coulomb a utilisé une astuce pour calculer la force d'interaction électrostatique : il a mesuré la période des oscillations autour de la position d'équilibre (la force étant proportionnelle au carré de la fréquence).

2. RÉVOLUTION FRANÇAISE ET RÉFORMES DES POIDS ET MESURES

La base des unités mécaniques et des futures unités électriques

2.1. Année 1789

Antoine LAVOISIER plaide pour le système décimal et en 1790 une commission composée de BORDA, CONDORCET, LAGRANGE, LAVOISIER et TILLET, dépose le rapport qui impose le système décimal pour la monnaie. Il fait fabriquer des boites de masses décimales pour les balances de précision qu'il utilise dans ses expériences de chimie.



Le chimiste LAVOISIER déterminant la formation de l'eau



Antoine LAVOISIER

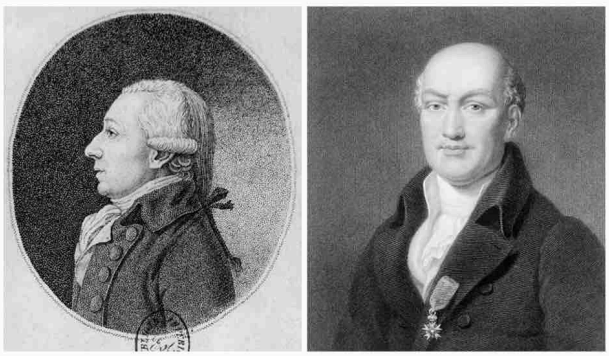
Né en 1743
Guillotiné en 1794

Après l'exécution de LAVOISIER, sous « la terreur », le mathématicien Louis LAGRANGE commente : « Il ne leur a fallu qu'un moment pour faire tomber cette tête et cent années, peut-être, ne suffiront pas pour en reproduire une semblable ».

2.2. Année 1791

Le mètre est défini par une commission composée de BORDA, CONDORCET, LAGRANGE, LAPLACE et MONGE, comme étant le 10 millionième du quart du méridien terrestre (circonférence). La raison de ce choix est motivée par le fait qu'il s'agit d'une base indépendante des susceptibilités locales, car commune à toute l'humanité (universalisme).

Les mathématiciens et astronomes Pierre MECHAIN (1744-1804) et Jean-Baptiste DELAMBRE (1749-1822) effectuent la mesure du méridien par triangulation.





2.3. Année 1795

le système métrique décimal est institué par la loi. Le kilogramme est défini comme la masse d'un décimètre cube d'eau distillée à 0°C. Les étalons sont reproductibles grâce à cette définition.



Étalon du kilogramme servant de référence internationale conservé au bureau international des poids et mesures de Sèvres (sous plusieurs cloches en poupées russes).

La division du temps en heures, minutes et secondes bien que non décimale, n'est pas remise en question car contrairement aux unités de longueur et de poids son usage est déjà universel.

3. LES GRANDES DÉCOUVERTES

3.1. Année 1800

Alessandro VOLTA invente la pile (électrolyse) et met ainsi fin à une controverse (l'une des premières « guerres scientifiques ») entre « l'électricité métallique » qu'il voulait démontrer et « l'électricité animale » de Luigi GALVANI. Le mythe de « l'électricité animale » perdurera un peu et alimentera la science-fiction avec en 1818 le roman de Mary Shelley, « Frankenstein ou le phénomène moderne ».



Pile voltaïque

Empilement de rondelles de Zinc et d'argent alternées, séparées par du carton ou du papier buvard imbibé d'eau salée.

VOLTA a conçu cette pile pour démontrer que l'électricité n'était pas d'origine biologique mais chimique.



Alessandro VOLTA

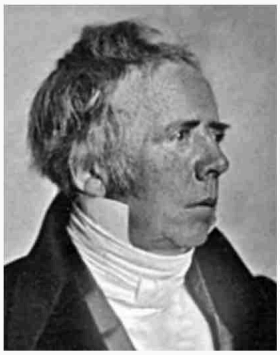
Né en 1745
Mort en 1827

3.2. Avril 1820

Hans Christian ØERSTED lors d'un cours devant ses étudiants observe que la direction d'une boussole est déviée en présence d'un courant électrique. Il n'a pas encore d'explication mais il a la bonne idée de publier tout de suite cette observation.

L'observation d'ØERSTED déclenche un enthousiasme considérable en Europe et tout ce qu'elle compte de savants se penche sur la question.

En réalité les effets magnétiques de l'électricité avaient été découverts dès 1802 par Gian Domenico ROMAGNOSI qui les avait publiés mais ils avaient été malheureusement quasiment ignorés.



Hans Christian ØERSTED

Né en 1777
Mort en 1851

3.3. Septembre 1820

André-Marie AMPÈRE s'intéresse au phénomène observé par ØERSTED et découvre que la direction dans laquelle se déplace l'aiguille de la boussole dépend de la direction du courant électrique qui circule à proximité et en déduit la règle dite du « bonhomme d'Ampère ». Il montre les interactions entre courants et attribue le magnétisme à l'existence de courants électriques y compris à l'intérieur des aimants, les phénomènes sont ainsi qualifiés « d'électrodynamiques ».

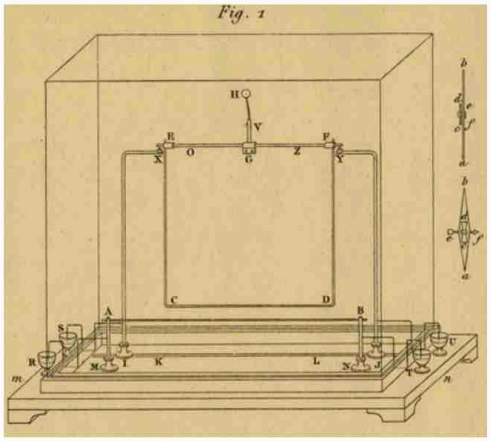


Figure de l'appareil mettant en évidence la force électrodynamique (interaction entre courants).



André-Marie AMPÈRE

Né en 1775
Mort en 1836

3.4. Année 1821

Michael FARADAY fait la démonstration « d'une rotation électromagnétique » basée sur l'interaction entre un conducteur de courant mobile et un champ magnétique fixe (l'inverse de l'expérience d'ØESTERD), qui est dans les faits, le premier moteur électrique

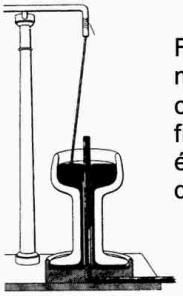
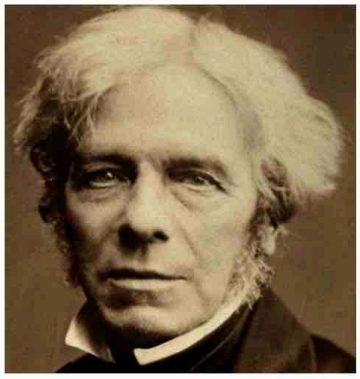


Figure du « premier moteur » électrique : Une tige métallique plonge dans un bain de mercure (métal conducteur) au centre duquel se trouve un aimant fixe. Lorsque la tige est parcourue par un courant électrique, celle-ci se met en mouvement autour du pôle de l'aimant.



Michael FARADAY

Portrait en 1842



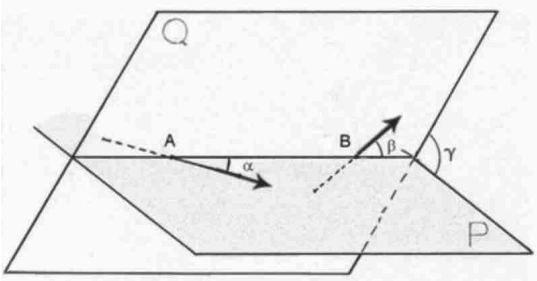
Michael FARADAY

Né en 1791
Mort en 1867

3.5. Année 1826

AMPÈRE publie sa « théorie des phénomènes électrodynamiques » qui sont formalisés mathématiquement pour la première fois : Il y exprime les forces d'interactions entre aimants et courants (Force, dite en France, de « LAPLACE ») et les forces mutuelles entre courants (Force d'AMPÈRE). Il distingue « l'électricité de tension » (potentiel électrique) de « l'électricité de courant » (électrodynamique).

La formulation de la force électrodynamique (entre courants) est un travail fondamental basé sur quatre faits expérimentaux qualitatifs utilisant la « méthode des cas d'équilibre » et permettant d'élaborer le modèle théorique1. Elle va entraîner des progrès considérables.



La formule fondamentale d'AMPÈRE exprime la force qu'exerce l'un sur l'autre, deux éléments de courants infinitésimaux I.ds et I'ds', placés à une distance r l'un de l'autre et d'orientations relatives définies par les trois angles α, β et γ.

L'élément de courant I.ds de milieu A, est situé dans le plan P.
L'élément de courant I'.ds' de milieu B, est situé dans le plan Q.

$$F = \frac{I\ I' ds\ ds' (\sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \frac{1}{2}\cos\alpha\cos\beta)}{r^2}$$

Ramené au cas où les plans P et Q sont confondus ($\gamma = 0$) et où les angles α et β sont droits, la force s'exprime :

$$F = \frac{I\ I' ds\ ds'}{r^2}$$

ATTENTION :

Les éléments ds et ds' sont infinitésimaux, il ne s'agit pas de l'expression d'une force avec des longueurs macroscopiques.

Précisions à propos de la force d'AMPÈRE et les formulations *« électrodynamique »* ou *« électromagnétique »* :

L'expression de la force *« électrodynamique »* définie par Ampère concerne des éléments de courants infinitésimaux ds et ds'. On ne doit surtout pas remplacer dans cette expression *« électrodynamique »*, ds et ds' par des valeurs de longueurs macroscopiques (Cela donnerait un résultat deux fois trop petit).

Les progrès dans l'écriture mathématique vectorielle ainsi que l'utilisation conjointe de la loi de LAPLACE et de celle de BIOT et SAVART, permettrons une formulation théorique électromagnétique des forces s'exerçant sur les conducteurs.

Ainsi la force *« électromagnétique »*, également appelée d'AMPÈRE, est une force par unité de longueur, qui pour deux conducteurs parallèles, rectilignes et infinis, de courants continus I et I', distants de r, s'exprime :

$$\frac{F}{L} = 2.\frac{I.I\prime}{r} \quad \text{Sans le facteur} \quad K_A = \frac{\mu_0}{4\pi} \quad \text{du système SI actuel}$$

3.6. Année 1827

Georg OHM établi la loi qui porte son nom en utilisant la conductivité d'un conducteur, sa longueur et sa section (ce qui définira la future résistance) et en utilisant les termes « force du courant » pour l'intensité, « différence des forces » pour la tension et « pouvoir conducteur » pour la conductivité.

$$U = \frac{1}{\sigma}.\frac{L}{S}.I$$



Geog OHM

Né en 1789
Mort en 1854

3.7. Année 1831

FARADAY découvre l'induction magnétique (« convertir le magnétisme en électricité ») et introduit la notion de champ. Un an avant lui, en 1830, Joseph HENRY avait découvert le phénomène d'auto-induction mais n'avait pas publié ses résultats.

$$e = -N.\frac{d\phi}{dt}$$

Loi de LENZ-FARADAY (énoncée par Emil LENZ à partir des travaux de FARADAY) : La force électromotrice (tension induite) est proportionnelle au nombre de spires N et à la vitesse de variation du flux magnétique dans le circuit. Le signe – indique que la f.em induite s'oppose à la cause qui l'a produite :

4. L'ÈRE DES MESURES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

4.1. Année 1832

Carl Friedrich GAUSS propose de définir les mesures électriques sur le millimètre, le gramme et la seconde, puisque les grandeurs électromagnétiques s'expriment par leurs interactions mécaniques et donc en fonction des unités précédentes.

La base de ce système de mesure est la force d'AMPÈRE qui s'exprime pour des courants parallèles, infinis et distants de r :

$$\frac{F}{L} = 2.\frac{I.I'}{r}$$

On voit que dans ce système de mesure, l'intensité possède la dimension de la racine carrée d'une force.

Gauss a œuvré en faveur du système métrique décimal qu'il considérait comme le plus cohérent pour les mesures en sciences physiques.

Les mesures effectuées directement en fonction des unités de bases de la mécanique sont qualifiées de mesures absolues car elles donnent une mesure directe et non relative à une autre.

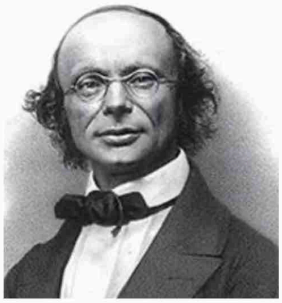


Carl Friedrich GAUSS

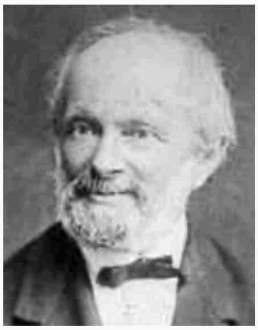
Né en 1777
Mort en 1855

4.2. De 1837 à 1843

GAUSS publie avec Wilhelm WEBER les résultats de leurs nombreuses mesures électromagnétiques effectués les années qui ont précédées. Les deux physiciens, amis dans la vie malgré leur différence d'âge, ont produit avec enthousiasme un travail fondamental pour les futurs systèmes de mesures.



Wilhelm WEBER à l'époque de ses travaux avec GAUSS



Wilhelm WEBER

Né en 1804
Mort en 1891

4.3. Année 1843

Wilhelm WEBER met au point son électrodynamomètre destiné à mesurer avec précision la force d'ampère. Cet appareil a permis de relier de façon encore plus fiable les grandeurs électromagnétiques aux unités des grandeurs mécaniques.

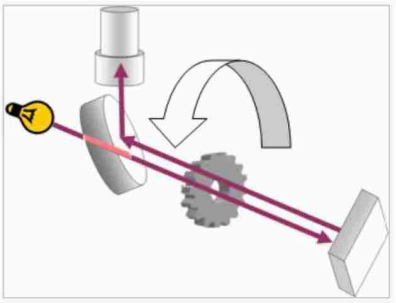


Électrodynamomètre

Le modèle ci-contre est celui construit par le physicien Henri PELLAT en 1880. La force qui s'exerce entre la bobine extérieure et la bobine intérieure est mesurée à l'aide d'un fléau de balance dont on cherche l'équilibre à l'aide d'une lunette de visée (pesage).

4.4. Année 1849

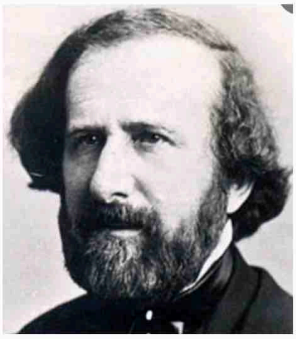
Hippolyte FIZEAU mesure la vitesse de la lumière à 315 000 km/s. Le caractère ondulatoire de la lumière avait été mis en évidence par Thomas YOUNG en 1801.



Méthode de mesure de la vitesse de la lumière avec une roue dentée.

L'appareil de FIZEAU





Il n'y a à ce moment-là, pas encore de rapport bien établi entre lumière et électromagnétisme. Pourtant Michael Faraday avait découvert 4 ans plutôt, en 1845, l'effet magnéto-optique qui porte son nom (effet Faraday).

Hippolyte FIZEAU

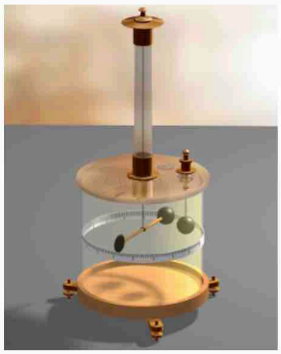
Né en 1819
Mort en 1896

4.5. Année 1850

WEBER propose d'utiliser deux systèmes de mesure (toujours basés sur le millimètre, le gramme et la seconde). Le premier pour l'électromagnétisme, déjà existant et désormais bien étalonné, est celui proposé par GAUSS et utilisé depuis 1932 et un nouveau pour l'électrostatique puisque les interactions mécaniques (Loi de Coulomb électrostatique) donnent des relations différentes avec les grandeurs mécaniques tant au niveau des valeurs que des unités.

La base de ce système de mesure électrostatique est la Loi de Coulomb qui s'exprimait :

$$F = \frac{Q.Q\prime}{r^2} \quad \text{Sans le facteur} \quad K_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \quad \text{du système SI actuel}$$



Balance de torsion de COULOMB

4.6. Année 1856

WEBER remarque avec Rudolf KOHLRAUSCH que les valeurs des charges issues respectivement des systèmes de mesures électrostatique et électromagnétique sont dans un rapport de vitesse et que cette vitesse est celle de la lumière :

Dans le système de mesure basé sur la loi de Coulomb, une charge est mesurée avec une valeur Q_{es} et une dimension $M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-1}$ (M=Masse, L=Longueur, T=Temps).

Dans le système électromagnétique, basé sur la force d'Ampère, une charge équivalente donne une valeur différente Q_{em} avec une dimension $M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}$.

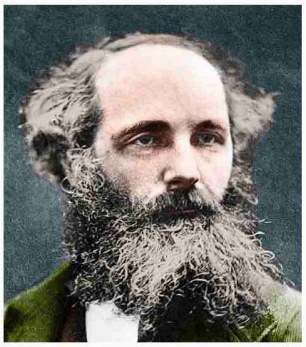
$$\text{On a en valeur et en unités :} \quad \frac{Q_{es}}{Q_{em}} = \text{vitesse de la lumière}$$

Il y a donc une incompatibilité entre les deux systèmes en raison de cette incohérence dimensionnelle. La connaissance de ce rapport permettra à Giovanni GIORGI de proposer en 1901 l'unification des deux systèmes de mesures.

5. NOUVELLES AVANCÉES THÉORIQUES

5.1. Année 1865 : unification de l'électromagnétisme par Maxwell

La découverte du rapport en « c » des charges électriques issues des deux systèmes, ainsi que la polarisation de la lumière par un champ magnétique mise en évidence par FARADAY en 1845, inspirent James Clerk MAXWELL :



James Clerk MAXWELL

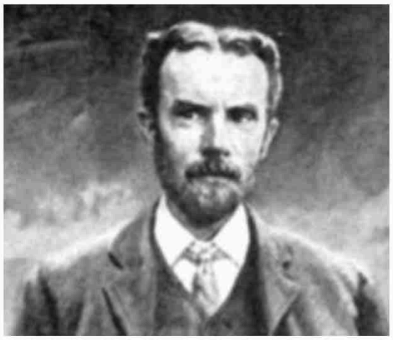
Né en 1831
Mort en 1879

A partir des travaux principalement d'AMPÈRE qu'il qualifie de « Newton de l'électricité », mais aussi de FARADAY et GAUSS, James Clerk MAXWELL développe une théorie unifiée de l'électromagnétisme qui aura des conséquences, beaucoup plus tard, au milieu du XX^{e} siècle, sur le système d'unité. La lumière est identifiée comme une onde électromagnétique.

En 1865, il présente un système de 20 équations qui régissent l'électromagnétisme en introduisant la notion de « courant de déplacement » puis en 1873 il reformule sa théorie sous forme de 8 équations.

5.2. Heaviside

En 1884, l'autodidacte et génial Oliver HEAVISIDE réduira les 8 équations de MAXWELL à 4, sous une forme correspondante aux besoins des applications pratiques électrotechniques.



Oliver HEAVISIDE

Né en 1850
Mort en 1925

Oliver HEAVISIDE a aussi établi l'expression de la force magnétique appliquée sur une charge en mouvement, (composante magnétique de la force de Lorentz).

Il suggèrera également à Giovanni GIORGI au début du XX^{e} siècle, l'utilisation du terme permittivité diélectrique ε_0 dans les expressions des forces d'Ampère et Coulomb, dans la définition du futur système d'unité MKSA.

Mais on n'en est pas encore là.

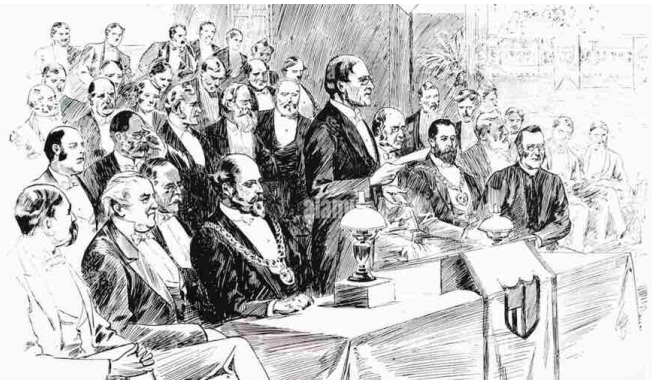
5.3. Résumé de la situation des mesures électriques à ce stade

Jusqu'en 1874 toutes les grandeurs électriques s'expriment comme des combinaisons des unités mécaniques (le millimètre le gramme et la seconde) à partir des interactions électromécaniques et sont issues, soit de la force d'Ampère (c'est le système de Gauss, il est le plus utilisé), soit de la force de Coulomb (c'est le système proposé par Weber). Les grandeurs électriques n'ont pas encore d'unités propres. Le rapport de charges identiques entre les deux systèmes est en vitesse lumière.

6. LE SYSTÈME DE MESURE CGS ET LES UNITÉS POUR LA PRATIQUE

6.1. Année 1874

Sous l'impulsion de MAXWELL et THOMSON (Lord KELVIN), le système CGS (Centimètre, Gramme Seconde) est proposé par la British Association for the Advancement of Science (BAAS, « Association britannique pour le progrès de la science ») :



La "*British Association for the Advancement of Science*" présidée par John Burdon-Sanderson en 1893.

En plus de l'adoption du système métrique décimal pour les sciences et techniques, la BAAS a également instauré, en 1874, les préfixes allant de micro à méga pour exprimer les sous-multiples ou multiples décimaux.

Dans ce nouveau système, les grandeurs mécaniques et électriques s'expriment en fonction des unités centimètre, gramme et seconde. Héritées des systèmes de GAUSS et WEBER mais en CGS, il existe donc deux variantes pour les unités électriques : le système CGS-UEM (électromagnétique) qui est le plus utilisé en raison de l'implantation historique grâce à GAUSS et le système CGS-UES (électrostatique) hérité de WEBER et qui est en rapport c ou c^2, selon les grandeurs, avec le précédent :

Grandeurs	UES	UEM	Rapport $\frac{UES}{UEM}$
I	$M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{3}{2}}.T^{-2}$	$M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{1}{2}}.T^{-1}$	c
U	$M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{1}{2}}.T^{-1}$	$M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{3}{2}}.T^{-2}$	$\frac{1}{c}$
P	$M.L^2.T^{-3}$	$M.L^2.T^{-3}$	1
R	$L^{-1}.T$	$L.T^{-1}$	$\frac{1}{c^2}$
Q	$M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{3}{2}}.T^{-1}$	$M^{\frac{1}{2}}.L^{\frac{1}{2}}$	c

Tableau : dimensions des systèmes UEM et UES

La BAAS fonde son système d'unités sur la force électromagnétique d'ampère (le système CGS-UEM) du fait de l'utilisation historiquement prépondérante du système de mesure électromagnétique initié par GAUSS.

La BAAS officialise la loi d'Ohm : U=R.I

Des unités plus pratiques pour l'industrie sont proposées :

- L'ohm est défini comme 10^9 unités du système CGS-UEM c'est à dire 10^9 cm/s. Cette nouvelle unité était plus appropriée pour les valeurs utilisées dans l'industrie, de plus elle était proche à 5% près de l'unité de résistance utilisée dans la pratique par les allemands que ceux-ci nommaient siemens et qui correspondait à la résistance d'un tube de mercure d'une section de 1mm^2 et 1 m de long (1SE=0,9536 ohm).

- Le volt (hommage à VOLTA) est défini comme 10^8 unités du système CGS-UEM c'est à dire $10^8 \text{g}^{1/2}.\text{cm}^{3/2}.\text{s}^{-2}$ (Car cette valeur est proche de la tension de la pile Daniell).

- Le weber (qui n'a rien à voir avec le weber de l'actuel SI) est l'ancêtre britannique de l'ampère : il est relié au volt et à l'ohm par la loi d'Ohm : 1weber = 1 volt/1ohm.

La BAAS précise l'expression de l'énergie électrique continue : W=U.I.t

En effet que ce soit en unités UEM ou UES on obtient la dimension d'un travail. Exemple : pendant une seconde, avec les valeurs de tension et courant qui correspondent aujourd'hui à un volt et un ampère :

En CGS UEM :

$$10^8 \text{ g}^{1/2}.\text{cm}^{3/2}.\text{s}^{-2} \,.\, 10^{-1} \text{ g}^{1/2}.\text{cm}^{1/2}.\text{s}^{-1} \,.\, 1s = 10^7 \text{g}.\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$$

En CGS UES :

$$1/3 \text{ g}^{1/2}.\text{cm}^{1/2}.\text{s}^{-1} \,.\, 3 \text{ g}^{1/2}.\text{cm}^{3/2}.\text{s}^{-2} \,.\, 1s = 10^7 \text{g}.\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$$

Les physiciens français adoptent ce système puisqu'il est indirectement basé sur le système métrique décimal et que les décisions de la BAAS sont judicieuses pour les unités électriques. Les allemands conservent le système de Gauss auquel ils sont habitués ainsi que leurs propres unités basées sur des étalons auxquels ils sont attachés pour des raisons pratiques.

6.2. Année 1881

En 1881, à lieu à Paris la première exposition internationale d'électricité.



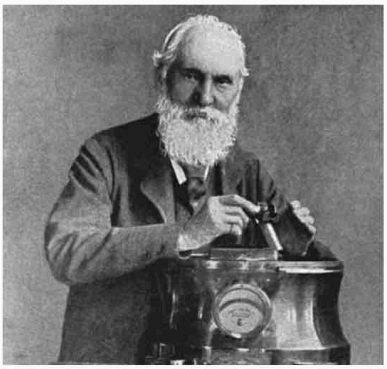
Exposition internationale d'électricité de Paris en 1881.

Palais de l'industrie

C'est lors de cette exposition que s'est réunie dans les salles du palais Trocadéro, le premier Congrès international d'électricité.

Parmi les membres de ce congrès, figure l'illustre physicien William THOMSON plus connu sous le nom de Lord KELVIN. Il avait, avec MAXWELL, impulsé l'adoption du système CGS par la BAAS.

Le kelvin deviendra en 1967 l'unité de température du système SI.



William THOMSON (Lord KELVIN)

Né en 1824
Mort en 1907

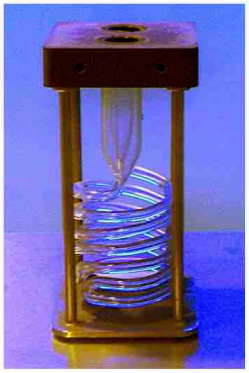
Le congrès prend les décisions suivantes :

- Adoption du système CGS.
- L'ohm et le volt conservent leurs valeurs du CGS-UEM définis en 1874 par la BAAS (10^9 pour l'ohm et 10^8 pour le volt).
- L'ohm étalon sera représenté sur le modèle du siemens allemand par une colonne de mercure d'un millimètre carré dont la longueur doit être ajustée par une commission internationale pour correspondre à sa valeur théorique (Ce sera 106 cm en 1884, affinée à 106,3 cm en 1893).

Ci-contre, l'étalon de résistance allemand (siemens de 1860) qui sert de modèle à l'étalon de l'ohm.

L'unité siemens, abandonnée en tant que résistance, a pris en 1971 une signification inverse en devenant l'unité SI de conductance :

$1S=1\Omega^{-1}$



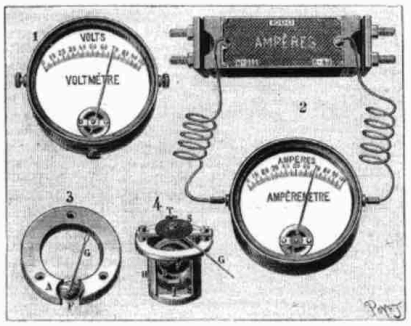
De nouvelles unités électriques sont créées, déduites de l'ohm et du volt :

- L'ampère dont c'est la première utilisation en tant qu'unité, sera l'unité du courant produit par un volt sur un ohm. Il remplace donc par cette définition, le weber britannique car il existe déjà un weber allemand de valeur proche mais différente et il y a un risque de confusion.

Ampèremètre

L'ampère vaut par sa définition théoriquement 0,1 unité CGS-UEM soit 0,1 $g^{1/2}cm^{1/2}/s$ mais cette mesure est difficile à réaliser par la force d'Ampère, c'est pourquoi il parait plus simple de le définir à partir de l'ohm et du volt.

Le nom weber en tant qu'unité d'intensité sera finalement totalement abandonné par les allemands puis repris en 1946 dans le système MKSA comme unité de flux magnétique.



- Le Coulomb est la quantité d'électricité débitée par un courant d'un ampère pendant une seconde.
- Le farad (hommage à FARADAY pour sa contribution à l'étude des diélectriques) est la capacité d'un condensateur contenant une charge d'un coulomb pour un potentiel d'un volt à ses bornes.

6.3. Année 1889

En 1889, lors d'un nouveau Congrès international d'électricité à Paris, il est décidé :

1. Le joule est l'unité de travail correspondant à un volt-coulomb (soit un volt-ampère-seconde). En effet d'après l'équivalence travail-chaleur mise en évidence par James Prescott JOULE et validée par la BAAS en 1874 : W= U.I.t donc W=U.Q. En 1840, James Prescott JOULE avait montré l'effet électrique qui porte son nom, puis l'équivalence entre chaleur et travail mécanique en 1843.



James Prescott JOULE

Né en 1818
Mort en 1889

2. Le watt est l'unité de la puissance, définie comme le quotient du travail par le temps pour le produire. Le watt correspond, en continu, à un voltampère (P=W/t= U.I). Cette dernière unité est issue du nom de l'ingénieur James WATT

James WATT est un homme du siècle précédent. Il est plus un très grand ingénieur qu'un physicien car il a surtout travaillé sur les machines à vapeur dont il a fait considérablement progresser la technologie.

On lui doit cependant ainsi qu'aux chimistes Joseph BLACK et Henry CAVENDISH, la distinction entre les notions physiques de chaleur latente et chaleur sensible.



James WATT

Né en 1736
Mort en 1819

Le choix du nom de cette nouvelle unité est une main tendue aux mécaniciens en vue d'une harmonisation, car ceux-ci tiennent leur propre congrès en parallèle.

Dans leur congrès, les mécaniciens alignent sur les électriciens, leurs définitions de la force, de la puissance et du travail souvent utilisées auparavant les unes à la place des autres :

- La puissance sera donc le quotient du travail par le temps pour le produire.
- Le travail représentera le produit d'une force par le chemin parcouru.
- Malheureusement, malgré la pression des électriciens, les mécaniciens refusent de faire évoluer leur système d'unités dépassé et conservent le kilogramme-force d'une valeur de 9,81 $kg.m/s^2$, le kilogrammètre (travail) et le cheval-vapeur (Puissance).
- D'autre part l'énergie est encore perçue comme une grandeur générale et conserve ses anciennes unités selon le contexte (kilogrammètre, calorie etc …). Toutes ces unités archaïques perdureront dans l'enseignement de la mécanique jusque dans les années 1960 obligeant les élèves à de pénibles conversions.



Le roi vapeur demande en chuchotant au roi charbon à propos du bébé électricité : « jusqu'où va t'il grandir ? »

Dessin humoristique de 1881 de l'hebdomadaire satirique Britannique « PUNCH » illustrant l'inquiétude des mécaniciens devant la montée en puissance des électriciens.

6.4. Année 1893

En 1893, l'exposition universelle se déroule à Chicago.

Exposition universelle de Chicago en 1893
(27 millions de visiteurs)

La première « grande roue »



13

Le Congrès international d'électricité est réuni de nouveau et décide :

- Le henry est l'unité de self-inductance donnant une variation de courant d'un ampère par seconde lorsqu'une tension d'un Volt est appliquée à ses bornes.
- Les unités ne seront plus définies par leurs valeurs théoriques mais par des étalons.

Ce dernier choix est malheureusement une grosse erreur car les étalons vont différer d'un pays à l'autre et on devra revenir plus tard à des définitions théoriques.

6.5. Un heureux hasard dans le choix du volt et de l'ohm

On a vu que ces deux choix ont été guidés initialement par des considérations technologiques, mais ils s'avèrerons être le résultat d'un bien heureux hasard lors du passage au système MKS. En effet l'ampère étant définit en 1881 par un volt sur un ohm il vaut :

$$10^{-1}\mathrm{g}^{1/2}\mathrm{cm}^{1/2}\mathrm{s}^{-1}$$

Ainsi le joule définit en 1889 par un volt-coulomb c'est à dire un volt-ampère-seconde, donne :

$$1\ \mathrm{J} = 10^{8}\ \mathrm{g}^{1/2}.\mathrm{cm}^{3/2}.\mathrm{s}^{-2}\ .\ 10^{-1}\ \mathrm{g}^{1/2}\mathrm{cm}^{1/2}\mathrm{s}^{-1}\ .\ 1\ \mathrm{s} = 10^{7}\ \mathrm{g.cm}^{2}.\mathrm{s}^{-2} = 1\ \mathrm{kg.m.s}^{-2}.1\ \mathrm{m}$$

Ce qui correspond au travail d'une force d'un newton (nommée unité MKS de force jusqu'en 1960) sur un mètre. Cette épatante correspondance facilitera l'adoption en 1946 du système MKSA proposé par Giovanni Giorgi en 1901. En effet, cette égalité, sans puissance de dix, entre le $\mathrm{kg.m}^{2}.\mathrm{s}^{-2}$ mécanique et le joule, unité d'énergie initialement électrique, incita les mécaniciens a adopter le joule et donc le watt au détriment de leurs unités archaïques (kilogramme force, cheval vapeur etc …). Le joule bien qu'ayant au départ été définit par l'électricité fut même définit par la mécanique avec cette définition-là. Le joule et le watt (qui correspond au précédent au temps près), sont les seules unités communes aux deux domaines. D'autres combinaisons d'unités de tension u_V et de résistance u_R auraient pu aboutir à l'égalité de puissance :

$$1u_V.1u_I = 1\ \mathrm{kg.m}^{2}.\mathrm{s}^{-3} = 1\ \mathrm{W}$$

Toutes les combinaisons donnant le rapport d'unités CGS UEM suivant, auraient pu convenir :

$$\frac{(1u_V)^2}{(1u_R)} = 10^{7}\ \mathrm{g.cm}^{2}.\mathrm{s}^{-3}$$

Avec u_V et u_R unités possibles de tension et de résistance exprimées en puissances de 10 des unités CGS UEM

Mais même en restant dans des ordres de grandeurs proches des besoins technologiques, de nombreuses combinaisons passaient à côté de ce 10^{7} et il est notable que ce soit à une part de chance qu'on doit de ne pas avoir eu des puissances de dix entre l'unité mécanique (le $\mathrm{kg.m}^{2}.\mathrm{s}^{-3}$) et le voltampère. A travers la pile Daniell et l'étalon de Siemens, la technologie à influencée ce choix qui s'avéra utile pour l'harmonisation avec la mécanique.

7. GIOVANNI GIORGI, PÈRE DU SYSTÈME DE MESURE MKSA

7.1. Critiques du système CGS

1. Le cm et le gramme sont des sous-multiples des unités définies.

2. Bien que toutes les unités électriques du système CGS-UEM venaient au départ de la mesure de la force d'AMPERE et donc de l'unité d'intensité, il n'en n'est plus rien puisqu'au contraire l'ampère est désormais défini à partir du volt et de l'ohm, eux-mêmes obtenus par étalonnage. D'autre part, les étalons varient d'un pays à l'autre.

3. On a toujours un deuxième système pour les mesures électrostatiques (le système CGS-UES) et les deux systèmes donnent des valeurs et des unités différentes, les mesures des charges sont dans un rapport de vitesse et cette vitesse est celle de la lumière.

7.2. Année 1901

Le physicien Giovanni GIORGI veut, pour supprimer tous ces inconvénients :

1. Revenir à une définition théorique directe, des grandeurs mécaniques et électriques.

2. Unifier les deux systèmes de mesures (électromagnétique et électrostatique) par l'introduction de constantes prenant en compte le rapport en vitesse lumière des charges.

C'est à l'association électrotechnique italienne que Giovanni GIORGI a présenté son nouveau système en 1901.



Giovanni GIORGI

Né en 1871
Mort en 1950

Il propose donc un nouveau système d'unités basé sur le mètre au lieu du cm et le kilogramme au lieu du gramme (ces deux unités étant définies directement) ainsi que la seconde et il suggère d'utiliser l'ampère comme nouvelle unité fondamentale de l'électricité, ce dernier étant défini par sa valeur théorique issue de la force d'Ampère.

GIORGI ne veut pas supprimer les unités électriques déjà utilisées. Or l'ampère a été défini comme un volt sur un ohm, soit $0,1$ g$^{1/2}$.cm$^{1/2}$.s^{-1} dans le système CGS UEM et correspond ainsi à une force d'Ampère de $0,02$ g.cm.s^2 d'après l'expression initiale sans constante de cette dernière, soit 2 10^{-7}kg.m.s^{-2}.

Ce sera donc sa définition dans ce nouveau système MKS :

"Un ampère est l'intensité d'un courant constant qui, s'il est maintenu dans deux conducteurs linéaires et parallèles, de longueurs infinies, de sections négligeables et distants d'un mètre dans le vide, produit entre ces deux conducteurs une force linéaire égale à 2x10^{-7} kg.m.s^{-2} ***par mètre "*** (L'unité Newton n'existe pas encore).

Note : La définition de l'ampère a été modifié dans le SI en 2019.

Il faut donc revoir l'expression de la force d'AMPÈRE et l'adapter à cette unité avec une constante K_A :

$$\frac{F_A}{L} = 2.K_A.\frac{I.I\prime}{r} \quad \text{avec} \quad K_A = 10^{-7}\ \text{kg.m.s}^{-2}.\text{A}^{-2}$$

D'autre part, pour unifier les deux systèmes de mesures, il faut adapter la loi électrostatique de COULOMB, à l'unité qui porte son nom. Mais le coulomb étant issu du système électromagnétique, il faut ajouter une constante K_C faisant le lien entre les deux systèmes :

$$F_C = K_C.\frac{Q.Q\prime}{r^2}$$

Détermination de K_C :

Par le produit Q.Q', la force de COULOMB contient des coulombs au carré, comme la force d'AMPÈRE puisqu'un ampère est égal à un coulomb par seconde. Ainsi le rapport des constantes doit respecter le rapport des charges (des systèmes UEM et UES) au carré, ce rapport étant égal à la vitesse lumière c :

$$\frac{K_C}{K_A} = \left(\frac{Q_{UES}}{Q_{UEM}}\right)^2 = c^2 \quad \text{soit} \quad K_C = K_A.c^2$$

L'idée de ce nouveau système commence à se répandre.

7.3. La rationalisation

Oliver HEAVISIDE qui a réduit à quatre les équations de MAXWELL, suggère alors à Giovanni GIORGI d'utiliser, dans les expressions des forces d'AMPÈRE et COULOMB, les termes μ_0 et ε_0, qu'il qualifie de « perméabilité magnétique et permittivité diélectrique du vide » (il est l'inventeur du deuxième terme) et de rationaliser le système par l'utilisation d'un facteur 4π. C'est à dire :

$$K_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \qquad K_A = \frac{\mu_0}{4\pi} \qquad \text{et donc} \quad \frac{K_C}{K_A} = \frac{1}{\mu_0\varepsilon_0} = c^2$$

Grace à quoi :

1) La formulation de la force de COULOMB exprime que l'influence d'une charge Q sur une charge Q', distante de r, est répartie sur la surface de la sphère de rayon r :

$$\vec{F} = \frac{1}{\varepsilon_0}.\frac{Q}{4\pi r^2}.Q'.\frac{\vec{r}}{r}$$

2) Il en est de même pour le champ magnétique induit par une charge Q en mouvement à la vitesse $\vec{v}$ avec la loi de BIOT et SAVART :

$$\vec{B} = \mu_0.\frac{Q}{4\pi r^2}.\vec{v} \wedge \frac{\vec{r}}{r}$$

3) Le facteur 4π qui apparaissait à l'époque dans les équations de MAXWELL disparaît et n'apparaît plus que dans les formules électriques où il a le sens d'un angle solide.

En conséquence de ces choix :

$$\mu_0 = 4\pi.10^{-7}\ \text{kg.m.A}^{-2}.\text{s}^{-2} \quad \text{et} \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = 8,854\ 187\ 82\ .\ 10^{-12}\text{F.m}^{-1}$$

A ce stade le système MKSA n'est toujours pas adopté mais l'idée de ce nouveau système rationalisé fait très lentement son chemin.

Anecdote : Heaviside fulminait contre le facteur 4π qui apparaissait dans les équations de Maxwell : il le jugeait « particulièrement odieux et trompeur » et le nommait « l'excroissance », ajoutant : *« En privé j'utilise des unités qui s'en débarrassent complètement, puis pour la publication, j'assaisonne généreusement de 4π pour convenir au goût des lecteurs nourris d'unités B.A.*»* (*British Association). Extraits de : Electrical papers. V.1, 1892 : Macmillan and Co.

8. LE SYSTÈME MKSA PUIS SI

8.1. Le MKSA

En 1946, presqu'un demi-siècle après sa proposition initiale, lors de la 9eme conférence générale des poids et mesures, le système MKS de GIORGI avec ses définitions des unités électriques est enfin adopté comme système international d'unités (résolution 2).

L'ampère avec sa définition théorique (GIORGI 1901) est donc ajouté comme unité fondamentale à ce nouveau système qui devient de ce fait, le système MKSA.

L'unité de force (futur newton) définie à 1 kg.m.s^{-2}, reste une unité mécanique dérivée sans nom, appelée unité MKS de force. Les unités de puissance et d'énergie issues de l'électricité, le watt et le joule, s'appliquent désormais à la mécanique et le joule se définit même par elle, il reçoit donc une définition qui n'est plus électrique : il correspond au travail de l'unité de force sur un mètre.

$$W = F.L \qquad 1\ J = 1\ \text{Kg.m.s}^{-2}\ .\ 1\ \text{m}$$

Une puissance d'un watt correspond toujours au travail d'un joule produit en une seconde.

$$P = \frac{W}{t} \qquad 1\ \text{W} = \frac{1\ \text{J}}{1\ \text{s}}$$

Le volt est défini comme la tension continue qui sous un ampère donne un watt.

$$U = \frac{P}{I} \qquad 1\ \text{V} = \frac{1\ \text{W}}{1\ \text{A}}$$

Le weber est défini comme le flux magnétique dans le circuit d'une seule spire (n=1), qui produit une force électromotrice d'un volt lors d'une décroissance uniforme d'une seconde.

$$e = -n.\frac{d\phi}{dt} \qquad 1\ \text{V} = -1.\frac{-\ 1\text{Wb}}{1\ \text{s}} \qquad \Rightarrow \qquad 1\ \text{Wb} = 1\ \text{V.s}$$

8.2. Le SI

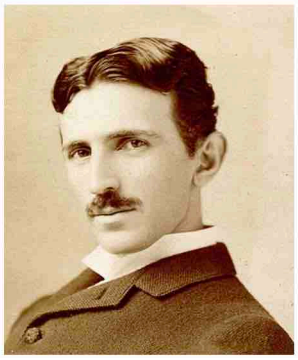
En 1954, L'unité de température thermodynamique (dont le nom kelvin ne sera véritablement donné qu'en 1967) et le candela sont ajoutées en tant qu'unités fondamentales.

En 1956, Le système MKSA, après l'ajout du kelvin et du candela comme unités fondamentales en 1954, prend le nom de « Système International d'unités ».

En 1960, l'unité MKSA de champ d'induction magnétique (un weber/m2), prend le nom de tesla.

$$\phi = B.S \qquad 1\text{Wb} \;=\; 1\text{T}.\,1\text{m}^2 \qquad 1\text{T} \;= 1\,\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

Nikola TESLA est un ingénieur et inventeur qui a démontré l'avantage du courant alternatif dans la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique. On lui doit donc notre système actuel. Il est également l'un des inventeurs du moteur asynchrone, moteur électrique correspondant à plus de 80% des applications.
Il a environ 300 brevets à son actif.



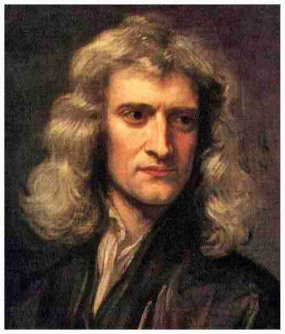
Nikola TESLA

Né en 1856
Mort en 1943

A cette même conférence, l'unité MKS de force prend enfin celui de newton : $1\ \text{N} = 1\ \text{kg.m.s}^{-2}$



Isaac Newton devenu le personnage d'un gag récurent de bande dessinée sous le crayon du dessinateur Marcel Gotlib



Isaac NEWTON

Né en 1642
Mort en 1726

Isaac Newton est parmi les derniers dont le nom soit pris comme unité, il a pourtant été l'un des premiers grands scientifiques et il a inspiré tous les autres.

En 1971, la mole a été ajoutée comme unité fondamentale.

En 2018, les sept unités SI de base ont reçues de nouvelles définitions extrêmement précises qui les ont éloignées de leur définition d'origine, l'ampère est désormais défini par son sens réel de débit d'électrons.

Remarque importante : L'ampère a perdu en 2018 sa définition issue de la force d'ampère mais les équations électriques, ajustées par des constantes (perméabilité et permittivité) aux valeurs qu'expriment cette unité, demeurent. Il ne faut donc jamais perdre de vue que les valeurs de ces constantes sont dues au choix qui ont été fait par le passé pour définir cette unité. Si le choix de l'unité de courant électrique avait été autre, on aurait toujours :

$$\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0} = c^2$$

Mais ce seraient les valeurs de $\mu_0$et de ε_0 qui seraient différentes. Cette relation est la conséquence de l'incompatibilité initiale entre les systèmes UEM et UES, constatée par Weber et Kohlrausch en 1856 et de l'uniformisation des lois lors du passage au MKSA.

REFERENCES

[1] Borvon, G., *Histoire de l'electricite, de l'ambre a l'electron*. Paris: Vuibert, 2009.

[2] Blondel, C. and G. Borvon, "Les unites electriques et leur unification," Histoire de l'électricité et du magnetisme, 2008, https://ampere-archives.fr/histoire-electricite/parcours-historique/unites-electriques/unification.

[3] Blavier, E. E., *Des grandeurs electriques et de leur mesure en unites absolues*. Paris: Dunod, 1881.

[4] Blondel, C. and G. Borvon, "Le coulomb, l'ampere, le volt, le watt, l'ohm," Histoire de l'électricité et du magnetisme, 2008, https://ampere-archives.fr/histoire-electricite/parcours-historique/unites-electriques/histoire.

[5] Heaviside, O., *Electrical papers VOL.I*. London: Macmillan and co, 1892.

[6] Fleury, P., "Coordination des unites mecaniques et electriques en un systeme pratique international : formules classiques ou rationalisees," *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 9, 1948, https://hal.science/jpa-00234082/document.

[7] Darrigol, O., *Les equations de Maxwell de MacCullagh a Lorentz*. Paris: Belin, 2005.

[8] Maxwell, J. C., *Traite d'electricite et de magnetisme. tomes I et II (traduction de la 2eme edition anglaise par G. Seligmann-Lui)*. Paris: Gauthier-Villars, 1885.

[9] Bruhat, G., *Electricite, Cours de Physique Generale, 8eme edition revue par Georges GOUDET*. Paris: Masson & Cie, 1963.