Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 27 (1936)

Heft: 22

Artikel: Un système absolu pratique, qui permet de substituer sans difficulté les unités absolués aux unités internationales actuelles

Autor: König, Hans

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057537

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:
S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVIIe Année | N° 22 | Vendredi, 30 Octobre 1936

Un système absolu pratique, qui permet de substituer sans difficulté les unités absolués aux unités internationales actuelles.

Par *Hans König*, Berne,
Vice-directeur du Bureau fédéral des Poids et Mesures.

621.317.081

La décision prise par la Conférence Générale des Poids et Mesures de substituer, dans un délai assez rapproché, les unités absolues aux unités internationales se heurte à certaines résistances motivées de la part des électrotechniciens.

Au point de vue théorique, l'idée de passer aux unités absolues en se basant sur les propriétés naturelles élémentaires servant de mesures naturelles est parfaitement fondée; elle peut et doit être maintenue. Par contre, il faudrait supprimer le principe selon lequel les unités doivent être des puissances décimales **exactes** *des anciennes unités électromagnétiques CGS (perméabilité du vide $\mu_0 = 1$), car il n'apporterait aucun avantage théorique et conduirait à des inconvénients d'ordre pratique.*

L'auteur démontre que la définition

$$[\mu] = 1{,}000\,500 \cdot 10^7 \cdot \mu_0$$

pour la quatrième unité — qui est, selon Giorgi, la dernière qui peut être choisie à volonté — satisfait à toutes les exigences théoriques et pratiques. Il montre en outre que la question souvent débattue de savoir si l'ohm est mieux approprié que l'ampère comme quatrième unité peut être une source d'erreurs et mettre réellement en danger les tentatives d'unification, lorsqu'elle est mal interprétée.

Der Beschluss der Generalkonferenz für Mass und Gewicht, in absehbarer Zeit von den internationalen zu den absoluten Einheiten überzugehen, stösst in den Kreisen der Elektrotechniker auf begründeten Widerstand.

Der Grundgedanke des Uebergangs zu den absoluten Einheiten im Sinne einer Zugrundelegung von elementaren Natureigenschaften als Naturmassen ist theoretisch wohl begründbar; er kann und soll daher beibehalten werden. Hingegen muss der Grundsatz, dass die Einheiten **reine** *Zehnerpotenzen der alten elektromagnetischen CGS-Einheiten (Permeabilität des leeren Raumes $\mu_0 = 1$ gesetzt) sein sollen, fallen gelassen werden, weil er theoretisch keinen Gewinn bringt und zu praktischen Unzukömmlichkeiten führen würde.*

Es wird gezeigt, dass z. B. die Definition

$$[\mu] = 1{,}000\,500 \cdot 10^7 \cdot \mu_0$$

für die vierte und im Sinne von Giorgi letzte frei wählbare Einheit allen theoretischen und praktischen Anforderungen genügt. Ferner wird gezeigt, dass z. B. die oft erörterte Frage, ob das Ohm als vierte Einheit geeigneter sei als das Ampère, irreführend und den Vereinheitlichungsbestrebungen direkt schädlich sein kann, wenn sie vom unrichtigen Standpunkt aus behandelt wird.

(Traduction.)

Selon les mesures absolues les plus récentes, les relations entre les unités internationales et les unités absolues sont les suivantes, à la quatrième décimale près [1] [2]:

1 ampère international		= 0,9999	ampère	absolu
1 coulomb	»	= 0,9999	coulomb	»
1 ohm	»	= 1,0005	ohm	»
1 volt	»	= 1,0004	volt	»
1 henry	»	= 1,0005	henry	»
1 farad	»	= 0,9995	farad	»
1 weber	»	= 1,0004	weber	»
1 watt	»	= 1,0003	watt	»

«International» signifie: rapporté à la définition de l'ohm et de l'ampère par colonne de mercure et équivalent de l'argent; «absolu» signifie: dérivé du système classique de Maxwell, dit CGS (perméabilité du vide $\mu_0 = 1$) à l'aide de facteurs qui sont des puissances décimales exactes.

La décision de la Conférence Générale des Poids et Mesures d'introduire dès le 1er janvier 1940 les unités absolues [1] [2], se heurte à une résistance de plus en plus vive de la part des praticiens qui protestent contre la modification pratique de la valeur de l'ohm [3] [4]. Il en résulte une situation extrêmement critique [5].

[1]) Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures, Session de 1935. Résolutions: pages 74 et suiv.; elles sont reproduites dans la communication du Bureau fédéral des Poids et Mesures mentionnée sous 2).

[2]) L'introduction du système absolu des unités électriques, voir Bull. ASE 1936, No. 21, p. 589.

[3]) Procès-Verbaux, loc. cit., p. 331, 338, 344, 360.

[4]) Physikalische Zeitschrift, 1935, No. 36, p. 819.

[5]) Remarque faite au cours de la discussion qui suivit une conférence de Sommerfeld par Wallot [4]: «...En 1933, la Conférence Générale des Poids et Mesures a *uniquement* décidé de supprimer *complètement* les unités internationales et de *définir* à une date à fixer les unités ampère, volt, watt, etc. comme multiples décimaux des unités électromagnétiques et non pas de les *rapprocher* de ces multiples décimaux. Cette décision, qui doit être considérée — paraît-il — comme définitive (la Conférence Générale ne se réunira à nouveau qu'en 1939), a été précédée de controverses qui durèrent de nombreuses années. Les Allemands ont toujours répété que cette modification est inutile, qu'elle n'apportera aucun avantage notable, mais qu'elle aura au contraire de nombreux et importants désavantages, comme M. Emde vient de nous l'expliquer avec pertinence. Malheureusement, tous les efforts sont restés vains et il ne nous reste plus, à mon avis, que de nous accomoder tant bien que mal du fait accompli.»

Les alternatives sont les suivantes:

Soit la substitution intégrale du système absolu, en étalonnant toutes les nouvelles résistances de précision en ohms ($= 10^9$ unités électromagnétiques CGS), (les inductivités et les capacités ne jouent qu'un rôle secondaire). On aurait alors simultanément pendant des dizaines d'années des résistances étalonnées différemment, c'est-à-dire un état de choses que nous considérons comme extrêmement désagréable, quoi qu'en dise le Comité International dans sa résolution 3 [1]) [2]).

Soit d'éviter cet état de choses en étalonnant simplement les nouvelles résistances en ohm international. Il en résulterait toutefois une situation pire que la précédente et sur laquelle il est inutile d'insister.

Soit d'étalonner officiellement les nouvelles résistances de façon que la valeur absolue dépasse la valeur nominale d'une quantité conventionnelle qu'il y aurait lieu de fixer (environ $^1/_2$ ‰). La substitution des unités absolues serait une simple formalité et ne constituerait pas un progrès notable par rapport à l'état de choses actuel.

Ces deux dernières alternatives mettraient gravement en danger l'idée d'unification internationale et ainsi l'autorité de la Conférence Générale.

Il devrait cependant être possible d'indiquer une solution qui permette d'une part de tenir compte de la tendance à substituer les unités absolues et, d'autre part, d'éviter la modification de $^1/_2$ ‰ de la valeur de l'ohm. A notre avis, cette solution est la seule qui permette de concilier l'idée fondamentale régissant les décisions prises par la Conférence Générale et les désirs motivés des praticiens. Cette solution consiste à se baser sur un système de Giorgi à quatre unités, où la quatrième unité soit une perméabilité:

$$\text{Quatrième unité: } [\mu] = p\mu_0$$
$$(\mu_0 = \text{Perméabilité du vide})$$

en posant par exemple $p = 1{,}000\,500 \cdot 10^7$. Nous considérons ce système comme «absolu» dans le sens étendu de ce mot, comme cela est d'ailleurs actuellement le cas d'une façon générale pour le système MKS avec $\mu_0 = 10^{-7}$.

Un accord au sujet d'une telle solution n'est naturellement possible que si les deux partis se font certaines concessions, qui ne consistent toutefois en majeure partie que dans l'abandon d'idées préconçues.

Après quelques remarques préliminaires au sujet des points sur lesquels praticiens et théoriciens devraient se mettre d'accord et surtout au sujet des questions dont la solution paraît être uniquement entravée par des malentendus, nous tenterons de faire ressortir la base fondamentale commune de toutes les tentatives et de montrer que l'exigence d'une substitution qui ne doit causer aucun désagrément ne constitue aucun obstacle sérieux, car nous verrons que la solution proposée ne doit pas du tout être considérée comme un compromis plus ou moins satisfaisant.

Le problème de l'élaboration d'un système cohérent semble fort simple à première vue. Il implique cependant toute une série de difficultés, qui proviennent du nombre relativement considérable des possibilités de groupement des unités à des fins les plus diverses et qui sont la source de malentendus. Dans notre exposé, nous ne craindrons donc pas les répétitions, ceci afin d'éviter autant que possible ces malentendus.

Ceux qui recommandent le choix de la moyenne internationale des valeurs supposables comme unité de résistance définitive insistent surtout sur le fait que la définition primitive du mètre et du kilogramme a pu être abandonnée sans désagréments et qu'il en serait de même pour l'ohm. Ce point de vue est complètement erroné. Tous les systèmes absolus actuels renferment une hypothèse au sujet de la perméabilité μ_0 du vide. A vrai dire, μ_0 n'est qu'un cas spécial de la valeur générale μ, mais ce cas spécial a une signification si importante que l'on peut affirmer que la nature nous offre elle-même dans ce cas une dimension naturelle caractéristique pour tous les phénomènes électromagnétiques naturels, car nous ne connaissons qu'*un seul* vide. Par opposition, la longueur du méridien et le poids spécifique de l'eau nous paraissent théoriquement sans intérêt, car leurs caractères sont individuels. Personnes ne songe à regretter que ces deux grandeurs ne constituent plus une base légale.

La question fondamentale qui se pose est donc la suivante: Quelle est réellement l'idée directrice qui doit nous guider dans le choix des unités (et non pas des étalons!)? C'est certainement la tendance à ramener à une valeur constante une valeur variable. Cela signifie: *choisir comme point de départ les dimensions d'un nombre restreint de propriétés naturelles reconnues fondamentales et simples, et leur donner un caractère dimensionnel par la détermination d'un nombre équivalent de chiffres.*

L'exemple suivant montre à quel point nous sommes fidèles à ce *principe*, qui est de choisir *comme point de départ des relations et des dimensions de la nature*, car elles sont à la base même de notre préférence parfaitement fondée pour les systèmes dits absolus. Le praticien le plus endurci n'a pas grand plaisir à utiliser une formule telle que celle-ci: 1 watt él. = 1,0003 watt méc. Nous sommes tous d'avis que la propriété fondamentale de la nature de présenter des formes d'énergie électromagnétiques doit s'exprimer par l'identité de mesure de l'énergie électique et de l'énergie mécanique. De même, dans l'équation de Maxwell bien connue

$$c = A / \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$$

c = Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques,
ε_0 = Constante diélectrique du vide,
μ_0 = Perméabilité du vide,
A = Facteur constant, dépendant de la constitution du système,

personne ne songerait à définir la valeur numérique de la grandeur c et ainsi une mesure électrique de la vitesse, qui ne soit pas identique à la mesure mécanique de la vitesse [6]). Nous ressentons en effet le besoin de définir comme propriétés fondamentales de la nature le fait qu'il existe des grandeurs électromagnétiques que nous pouvons identifier à des grandeurs mécaniques, en choisissant des facteurs de transformation égaux à 1. Dans ce cas, le principe essentiel d'introduire des relations fondamentales dans le système des unités est réalisé sous sa forme la plus pure. Pourquoi ne choisirions-nous pas en conséquence des dimensions naturelles comme point de départ dans tous les autres cas où il s'agit de *choisir* des unités, et non pas comme ci-dessus de *limiter* le nombre des unités? Lorsque nous exigeons que ce système soit absolu, notre intention est avant tout que la représentation des propriétés cinématiques de la nature, l'extension dans l'espace et dans le temps, soit faite par le choix d'une unité de longueur et d'une unité de temps, ainsi que la représentation des propriétés dynamiques par le choix d'une unité de masse. Selon Maxwell et Giorgi, l'introduction d'*une seule* propriété électromagnétique dans le système des unités suffit à compléter celui-ci, outre l'hypothèse $A = 1$.

Or, c'est seulement de la seconde que nous pouvons dire au besoin qu'elle est basée sur une dimension naturelle, sans oublier cependant que la durée du jour solaire moyen n'est certainement qu'un cas fortuit dans le cadre de l'évolution de l'univers. La tendance à exprimer le mètre en longueurs d'ondes lumineuses est due en bonne partie au fait que l'on a reconnu que le système atome de cadmium — vide est un système plus simple qu'une barre de platine et d'iridium. Nous sommes ici sur la bonne voie de remplacer par une dimension naturelle l'unité définie par l'étalon. Pour l'instant, on ne peut pas encore indiquer une dimension naturelle pour remplacer le kilogramme. Il est certain que les systèmes appelés absolus ne sont pas très «absolus»; toutefois, *le fait que nous n'avons pas encore réalisé l'idée de dimension naturelle pour le mètre et le kilogramme n'est pas une raison de ne pas se donner toute la peine possible pour poursuivre cet excellent principe quand il s'agit du choix d'une quatrième unité.*

L'argument que μ_0 par exemple ne peut pas être considérée comme une constante du point de vue d'une théorie physique générale n'est pas non plus une raison de remplacer le vide comme élément de définition par un groupe de fils de manganine qui est une représentation infiniment plus problématique.

[6]) Bien entendu, il ne s'agit pas dans ce cas de savoir si c est égal à la vitesse de propagation de la lumière ou si la lumière est de nature électromagnétique, mais bien de savoir si l'on veut ou non considérer la grandeur $A\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ comme l'équivalent d'une vitesse mécanique.

Un grand nombre de praticiens estiment malheureusement, sans l'avouer explicitement, que l'application du principe naturel pour le passage aux «unités» est une marotte des théoriciens, qui ne s'explique que par l'histoire du progrès. Cela ne concorde certainement pas avec le fond de la question.

Nous reprenons ici ces vieilles controverses pour bien montrer à quel point *l'idée d'un système cohérent avec quatre unités (Giorgi) est intimément liée à la décision prise par la Conférence Générale d'adopter les unités absolues.* Il n'est pas inutile d'insister à ce sujet, car des physiciens réputés croient que notre but est de mesurer avec précision une propriété électromagnétique, par exemple μ_0, à l'aide d'une unité déterminée préalablement. Si l'on a traité jusqu'ici le problème à rebours, du point de vue théorique, en considérant la perméabilité du vide en fonction de la conductibilité du mercure, cela tient au fait que pendant longtemps la précision absolue des mesures de résistance ne suffisait pas pour tous les besoins de la pratique, ce qui n'est plus le cas actuellement et le sera encore moins en 1940.

Wallot [7]) a montré avec raison que bien des obscurités proviennent d'une délimitation insuffisante des problèmes qui concernent les étalons d'une part et les unités d'autre part. Nous aimerions rappeler avant tout que l'opinion très répandue selon laquelle l'unité devrait être représentée directement par un étalon principal ne concorde pas avec la notion d'unité et entrave inutilement la liberté du choix de l'unité. Il suffit de nous observer nous-mêmes: Tout ce qui nous semble être un cas fortuit (par exemple un allongement de la longueur du mètre), nous cherchons à le supprimer en introduisant une correction. En d'autres termes, nous cherchons derrière l'étalon quelque chose d'abstrait, l'unité, pour laquelle nous établissons des relations rigides et que nous aimerions pouvoir considérer comme constante. L'opposition des buts ressort ainsi nettement. Le praticien doit exiger que les unités soient choisies de telle sorte que les étalons qui en découlent satisfassent à toutes les exigences bien-fondées de la technique appliquée des mesures de précision. Par contre, la décision de savoir ce qui est «constant» et peut être par conséquent utilisé pour le choix des unités est du ressort des théoriciens. Le choix des unités se fait de telle sorte qu'il ne reste plus aux théoriciens que d'admettre provisoirement telle ou telle propriété comme constante (avec corrections, le cas échéant). Le choix des unités est donc dans une large mesure une affaire d'*interprétation.* Constater une modification dans le système, c'est constater la modification d'une ou de plusieurs unités. Une telle modification bouleverse toute la physique et exige une revision de la théorie. Par contre, les étalons choisis uniquement par les praticiens sont considérés de prime abord comme variables; leur modification n'a donc aucun intérêt fondamental.

[7]) Procès-Verbaux, loc. cit., p. 352.

Un système qui ne renfermerait que des dimensions naturelles, telles que la vitesse de la lumière ou la perméabilité du vide, satisfairait certainement le théoricien, mais non le praticien, du moins pas immédiatement. Ce dernier doit toutefois se déclarer satisfait si l'on peut lui fournir des mesures de longueur, de durée et des bobines déterminées avec une précision suffisante d'après ce système. Il va de soi que l'on ne choisit pas volontairement des unités qui soient d'une autre nature que celle des étalons usuels. Il est donc fort naturel que l'ohm soit proposé comme quatrième unité. Toutefois, une différence de nature est recommandable si l'on peut ainsi apporter une clarté toute particulière au système; ce qui semble être précisément le cas au sujet de la résistance considérée comme étalon d'une part et de la perméabilité comme quatrième unité d'autre part.

Avant de pouvoir traiter plus à fond le choix de la quatrième unité, il y a lieu d'élucider parfaitement un point qui est essentiel pour bien comprendre l'idée du système absolu. Nous voulons parler du rôle du vide en tant que médium de l'étalon. Il a fallu très longtemps pour que l'on reconnaisse d'une façon courante que la perméabilité du vide doit être considérée comme une grandeur physique. Le mérite en revient à Giorgi, qui a mis en lumière la quatrième unité dissimulée derrière l'innocente équation $\mu_0 = 1$. La suppression de la dimension de la perméabilité dans les équations dimensionnelles a conduit, à proprement parler, à des inexactitudes. Sur les bobines-étalons, on peut lire en effet: «1 henry», sans indication du médium dans lequel la bobine doit être utilisée pour représenter réellement 1 henry! On a tout simplement oublié que la réalisation d'une inductivité n'exige pas seulement une constitution géométrique, mais également le médium dont l'action est électromagnétique. *Dans le système absolu, le médium-étalon est le fondement électrique concret de chaque quantité spécifiquement électrique.* Il est donc extrêmement regrettable que la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) à Scheveningen (1935) [8]) ait précisément exclu *cette* grandeur de son choix restreint, à cause de son caractère «abstrait».

Dans toute grandeur spécifiquement électrique, l'importance du médium doit être exprimée directement ou indirectement. Il s'ensuit que la décision de savoir si la perméabilité ou, par exemple, la résistance doivent être choisies comme quatrième unité (absolue) n'a pas la moindre conséquence pour la pratique, car dans toute détermination absolue de l'ohm l'incertitude est donnée directement par la réalisation de l'unité de perméabilité. La question de savoir si l'on doit préférer une grandeur concrète (R) ou abstraite est donc purement théorique. Sa solution se basera entièrement d'après le but que l'on désire atteindre par un certain classement dans l'importance des unités. Nous y reviendrons un peu plus loin.

Nous avons commencé notre exposé par ces considérations, car elles sont indépendantes de toute supposition en ce qui concerne les valeurs numériques à affecter aux unités. Nous allons traiter cette question du point de vue d'une suppression des désagréments d'ordre pratique qui pourraient résulter du changement des unités.

Nous avons essayé de montrer que le point principal qui permettra de concilier les efforts de la Conférence Générale des Poids et Mesures et ceux de la CEI *doit* résider dans un accord au sujet de la perméabilité du vide [9]). Si l'on pose, pour l'unité de la perméabilité

$$[\mu] = p\mu_0 \text{ [10])}$$

$$\text{par exemple } p = 1{,}000\,500 \cdot 10^7$$

on supprime le désagrément d'une modification de l'ohm, car

$$1 \text{ ohm (définitif)} =$$

$$[R] = [\mu] \cdot \frac{[\mathrm{m}]}{[\mathrm{s}]} = 1{,}000\,500 \cdot 10^7\, \mu_0\, [\mathrm{m}^1\mathrm{s}^{-1}]$$

Nous choisissons le nombre 1,000 500 pour bien montrer son caractère de définition. Tout nombre compris entre 1,000 450 et 1,000 500 se rapproche suffisamment de la valeur probable du rapport entre l'ohm absolu et l'ohm international actuel, pour ôter toute crainte aux praticiens.

Avant de prendre théoriquement position au sujet de ce choix, nous indiquerons brièvement ses conséquences pratiques. L'introduction de l'exigence

$$1 \text{ watt él.} = 1 \text{ watt méc.} = 1\ [\mathrm{m}^2\mathrm{kg}^1\mathrm{s}^{-3}]$$

considérée généralement comme évidente, a pour conséquence que

$$1 \text{ volt (définitif)} =$$
$$1{,}000\,250 \cdot 10^8 \text{ unités CGS actuelles,}$$

$$1 \text{ ampère (définitif)} =$$
$$0{,}999\,750 \cdot 10^{-1} \text{ unités CGS actuelles.}$$

Ce faible écart par rapport aux valeurs actuelles n'a pas de conséquences pratiques, à part le changement des étiquettes des éléments Weston et des résistances-étalons. On tient compte du fait que la précision des mesures relatives est plus grande que celle des mesures absolues en distinguant entre la précision interne et la précision externe, ainsi que nous allons l'expliquer à titre d'exemple pour la mesure de la résistance:

---

[8]) Un article sur le Système Giorgi paraîtra prochainement dans le Bulletin.

[9]) Procès-Verbaux, loc. cit., p. 207, 352.

[10]) Formule plus générale: $[\mu] = \frac{b}{4\pi} p\mu_0$, $b = 4\pi$ dans la représentation non rationalisée, $b = 1$ dans la représentation rationalisée (qui évite le facteur irrationnel 4π dans les équations du champ). Cf. Kohlrausch, 17e éd. (1935), p. 9.

Les étalons secondaires destinés à l'industrie sont étalonnés dans les Laboratoires nationaux, avec indication d'une incertitude absolue fixée par la Conférence Générale et qui est actuellement de $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ (externe). Les étalons primaires des Laboratoires nationaux sont comparés à Sèvres, où l'on détermine l'écart de la valeur probable (exacte jusqu'à la sixième ou septième décimale près) avec la valeur moyenne internationale de toutes les valeurs probables entrant en ligne de compte et où l'on prévoit une correction correspondante de leur valeur probable [11]). La valeur moyenne internationale constitue ainsi un élément d'équilibre entre les déterminations absolues entreprises périodiquement. Les Laboratoires nationaux qui peuvent effectuer des mesures absolues communiquent au Laboratoire central de Sèvres le quotient de la valeur absolue mesurée et de la valeur moyenne internationale, en indiquant l'exactitude de mesure absolue (quelques 10^{-5}). Au cas où la valeur moyenne des quotients entrant en ligne de compte s'écarte sensiblement de la valeur 1, la Conférence Générale décide qu'une modification de base (modification brusque de la valeur moyenne internationale) soit notée sur tous les procès-verbaux d'étalonnage.

Il nous semble superflu d'exposer ici en détail la détermination expérimentale du volt et de l'ampère.

Les théoriciens et les praticiens ont parfaitement raison d'être d'avis que les unités pratiques du système définitif doivent être autant que possible directement égales aux unités absolues déduites de ce système, en d'autres termes qu'il ne doive se présenter autant que possible [12]) ni multiples décimaux, ni autres facteurs dans le système des unités (unités fondamentales plus unités dérivées; il n'est pas question ici des multiples d'ordre technique).

Par contre, il en va tout autrement en ce qui concerne la relation qui existe entre les *différents* systèmes. *Nous protestons vivement contre l'exigence selon laquelle le système définitif doit correspondre numériquement au système électromagnétique pratique actuel,* car cette exigence est basée sur une *fausse interprétation du problème.* Notre assertion peut paraître quelque peu osée, mais s'explique très simplement:

La relation avec le système électromagnétique pratique a une *importance tout à fait secondaire* pour le praticien, car ce système doit être en effet abandonné par la pratique, ainsi que le système international actuel, et remplacé par le système définitif, qui sera à la fois pratique, absolu et international. Les générations futures n'attacheront pas plus d'importance à notre système électromagnétique absolu actuel ($\mu_0 = 1$) qui constitue la base du système électromagnétique pratique actuel, que nous n'en attachons actuellement au système électrostatique absolu ($\varepsilon_0 = 1$). Ces deux systèmes ne seront mentionnés que dans les manuels détaillés à titre de possibilités théoriques équivalentes. Les efforts d'unification internationale devraient les laisser tous deux de côté, mais non pas le système de Gauss, dont personne ne nie l'harmonie et l'élégance remarquables et que l'on pourrait volontiers recommander officiellement comme étant le système qui sert le mieux les buts de la physique théorique. La seule exigence qui pourrait donc être éventuellement posée, est celle d'une relation aussi simple que possible entre le système de Gauss ($\mu_0 = 1$; $\varepsilon_0 = 1$) et le système définitif ($[\mu] = p\mu_0$; dérivé: $[\varepsilon] = [\mathrm{m^2\,s^{-2}}\,[\mu]^{-1}] = p^{-1}\,\mu_0^{-1}\,[\mathrm{m^2\,s^{-2}}]$). Cette relation est donnée dans ses grandes lignes, car le système de Gauss, construit sur des suppositions symétriques pour ε_0 et μ_0, est un système à cinq unités avec facteur de transformation c, que le système définitif pratique à quatre unités ne possèdera pas et qui représente une propriété du vide *qui doit être encore mesurée avec précision.* Ce facteur apparaît dans la plupart des facteurs de transformation qui permettent de passer de l'une à l'autre des unités correspondantes des deux systèmes. La relation est donc très souple; sa détermination abstraite est une question de théorie, mais au point de vue numérique elle doit être considérée comme un résultat de mesures. Il nous paraît *absolument sans importance* que p, par exemple, apparaisse sous la forme 10^7 ou $(4\pi)^{-1} \cdot 10^7$ ou encore $1{,}000\,500 \cdot 10^7$ dans le nombre $\left.\frac{\varepsilon_0}{[\varepsilon]}\right|_{\text{definitif}} = \frac{p}{c^2\,[\mathrm{m^{-2}\,s^2}]}$ qui indique la valeur numérique de la constante diélectrique du vide dans le système $p\mu_0$ et par conséquent le facteur de transformation pour la constante diélectrique, à cause de $[\varepsilon]|_{\text{Gauss}} = \varepsilon_0|_{\text{Gauss}} = 1$. En effet, la valeur de c (vitesse de la lumière) n'est d'ailleurs pas un nombre entier. *Le fait qu'un exposant est un nombre entier n'offre pas le moindre avantage théorique et il peut être un nombre fractionnaire sans le moindre désavantage pratique.* Considéré à ce point de vue, il aurait même été préférable que p s'écartât non pas seulement de $^1/_2$ ‰ du multiple décimal exact, mais bien de 50 % par exemple, car cet écart — que l'on doit d'ailleurs exprimer, puisqu'il s'agit de deux notions différentes — ressortirait plus nettement en valeur numérique.

On ne doit naturellement pas supposer que cette dernière remarque signifie que, par le choix de $[\mu] = p\mu_0$, $p \neq 10^7$, les efforts faits pour ramener autant que possible les unités internationales aux unités électromagnétiques pratiques ont été ultérieurement déclarés superflus. Le raisonnement suivant montre nettement qu'une telle conception serait absolument fausse. Supposons qu'en 1893 (Chicago) ou en 1908 (Londres) l'ampère ait été exact, tandis que l'ohm absolu choisi ait été entaché d'une erreur de 1 %. Dans ce cas, le volt et le watt électrique absolus seraient également entachés d'une erreur de 1 %. Une substitution du watt absolu à ce faux

[11]) Procès-verbaux, loc. cit., p. 94.

[12]) Pour l'induction, on devra se contenter du fait que l'unité primaire dérivée = 1 weber/1 m² = 10^4 Gauss.

watt international aurait pour conséquence, dans le cas le plus favorable (maintien de la fausse valeur de l'ohm), que le volt et l'ampère devraient être modifiés de $^1/_2$ %! Ainsi, *les efforts entrepris jusqu'en 1908 dans la technique des mesures et dans l'organisation ont leur plein effet.* Il en va exactement de même pour les efforts ultérieurs, sauf que nous les *interprétons* d'une façon différente. *p n'est pas un nombre que l'on doit mesurer aussi exactement que possible avant l'année 1940, mais bien un nombre fixé pour l'éternité et rapproché d'un certain facteur qui a déjà été déterminé jusqu'ici avec une précision suffisante pour toutes les applications pratiques* ($2 \cdot 10^{-5}$). La conception modifiée n'a d'effet que sur le genre de l'indication des résultats des mesures, mais non pas sur l'exécution des mesures absolues ultérieures.

Malheureusement, la preuve ci-dessus qu'un système MKSμ avec $[\mu] = p\mu_0$ comme quatrième unité pourrait être considéré comme le but commun de tous les efforts, se heurte au point de vue des praticiens, selon lesquels μ ne doit pas entrer en ligne de compte comme grandeur fondamentale. Il ne paraît pas facile de trouver un compromis. Nous essayerons cependant, à l'aide d'une discussion systématique de tous les points de vue entrant en ligne de compte pour le choix de la quatrième unité, d'indiquer un tel compromis, qui consiste essentiellement en une *conception plus rigoureuse de la notion de système et une introduction des regroupements d'unités dérivées dans le cadre du système MKSμ.*

Le choix de la quatrième unité dépend entièrement du but que doit remplir le groupement d'unités cherché (nous évitons intentionnellement l'expression de «système»). Les opinions peuvent être les suivantes:

a) Le groupement, servant aux buts de la *physique théorique,* doit mettre autant que possible en valeur l'harmonie de la constitution *(système didactique théorique).*

b) Le groupement, servant aux buts de l'*électrotechnique théorique,* doit exprimer aussi clairement que possible et indépendamment de tout arbitraire la structure de l'électromagnétisme, en partant du principe des quatre unités *(système didactique électromagnétique pratique).*

c) Le groupement, servant aux besoins de l'*électrotechnique pratique,* doit permettre une description aussi simple que possible des principales relations pratiques, en partant du principe des quatre unités *(groupement descriptif).*

d) Le groupement doit refléter le *rapprochement expérimental* aux unités mécaniques, auquel tendent les grands laboratoires *(groupement de rapprochement).*

e) Le groupement servant aux buts de la technique des mesures *pratiques* doit indiquer comment une unité quelconque doit être dérivée des étalons échangeables *(groupement d'échange).*

Nous ne nous occuperons pas de la question de la rationalisation des unités, car cette question peut être traitée indépendamment du problème qui nous intéresse pour l'instant.

En ce qui concerne *d)*, l'argumentation peut être la suivante: Au cas où l'on peut supposer que, dans un avenir plus ou moins rapproché, la précision absolue que l'on peut atteindre pour une grandeur (R, L, C) électrocinématique (c'est-à-dire ne renfermant, à part la perméabilité, que la longueur et le temps) soit plus grande que pour une grandeur (I, U, Q, etc.) électrodynamique (renfermant la notion de force ou d'énergie), la quatrième unité devrait être choisie dans le premier groupe, car la précision absolue d'une grandeur quelconque dérivée de l'unité est moindre que la précision absolue de l'unité. Si l'on choisit donc l'ampère absolument exact à $1 \cdot 10^{-4}$ comme quatrième unité, on commet déjà une faute de principe contre le caractère d'unité de l'ampère, dès que l'on prétend qu'une résistance peut être déterminée avec une précision absolue à $2 \cdot 10^{-5}$, car une telle prétention doit s'appuyer sur des unités qui se trouvent *derrière* l'ampère. A ce point de vue, l'ampère n'est pas approprié comme unité fondamentale.

Il est toutefois intéressant de constater que cette argumentation, que nous venons d'exposer parce qu'elle pourrait inciter certaines personnes à décider en faveur de l'ohm par rapport à l'ampère, est un coup nul. En effet il ne faut pas oublier que dans le système de Giorgi une seule unité peut être choisie librement, tandis que l'on doit procéder à une mesure absolue du courant (outre la mesure absolue de la résistance) comme équivalent expérimental du principe de l'équivalence de l'énergie (ou force) électrique et de l'énergie mécanique. L'argumentation mentionnée recommande implicitement les groupements *d)* ou *e)*, qui sont tous deux contraires à l'exigence de Giorgi, qui ne prescrit que quatre unités.

Il est extrêmement important que l'on se rende parfaitement compte que la discussion au sujet de la quatrième unité ne peut avoir lieu *que sur la base des exigences b) ou c)*, car l'exigence *a)* n'entre également pas en ligne de compte, comme nous l'avons déjà dit.

En ce qui concerne *b)*, il ne fait aucun doute qu'un multiple de la perméabilité du vide est l'unité donnée, car ce choix évite tout arbitraire. La désignation explicite de la perméabilité comme grandeur physique avec dimension propre exclut toute imprécision et toute incorrection; elle satisfait en outre à l'exigence fondamentale, selon laquelle les unités d'un système théorique satisfaisant doivent être définies par des propriétés naturelles. Du point de vue de *b)*, le choix de n'importe quelle autre grandeur spécifiquement électrique devrait être combattu, car la définition MKS de cette unité *devrait* contenir la définition de l'unité de perméabilité.

Le point de vue des praticiens, qui a trouvé son expression dans l'éviction de μ du choix restreint, ne doit pas être considéré seulement comme une confusion des fonctions afférant à une unité et à un étalon, mais il montre que les buts de *b)* et *c)* sont manifestement opposés. Les praticiens paraissent désirer que la première des unités du groupe ne

soit pas une grandeur d'importance *fondamentale* telle que μ, mais bien une grandeur d'importance *centrale*. A ce point de vue, une grandeur dynamique, telle que le courant I, dont les relations avec les autres grandeurs du groupement *b)* sont simples et qui évite des puissances fractionnaires dans les équations dimensionnelles [13]), serait mieux appropriée que la résistance R par exemple. Il ne faudrait toutefois pas se donner trop de peine à chercher un beau schéma de constitution, car *tous les groupements descriptifs (type c) sont entachés d'arbitraire et ne conviennent par conséquent jamais à tous.*

La substitution des unités absolues est nécessairement liée à une hypothèse sur une propriété électrique du vide. Comme cette substitution doit servir dans la même mesure à élucider pratiquement et théoriquement la question, et qu'un établissement indépendant du système pratique définitif par la Conférence Générale d'une part et par la CEI d'autre part doit être absolument évité dans l'intérêt de l'unification, il semble évident de *ramener à la formule générale b) aussi bien les efforts de la CEI que ceux de la Conférence Générale.* Pour l'instant, il est sans importance que la perméabilité du vide ait telle ou telle valeur numérique. L'essentiel est qu'*un seul* système soit prépondérant tout au moins dans les manuels d'électrotechnique et dans tous les travaux originaux d'électrotechnique. A cet effet, il est recommandable de *considérer le but c) comme subordonné au but b)* et de borner l'application de la notion de système aux groupements *a)* et *b)*. Il est également recommandable d'ôter aux groupements *d)* et *e)* le caractère d'un système, dans une mesure encore plus grande que pour le groupement *c)*. Par cette distinction rendue possible par une notion du système plus rigoureuse, nous voulons faire ressortir ce qui suit:

La *caractéristique du système* réside dans la *mise en vedette* aussi peu arbitraire que possible de certaines unités principales dans le cadre d'un principe supérieur. Si l'on considère que les unités principales, aussi bien que les unités dérivées et les combinaisons de ces dernières, ont des droits équivalents, on peut procéder à l'intérieur de cet ensemble d'unités à un regroupement (dans le genre d'une transformation de coordonnées) selon des points de vue spéciaux *subordonnés*, par comparaison aux principes qui caractérisent la notion de système. Le choix des unités ayant priorité sur les autres peut avoir lieu arbitrairement (comme pour *c)* ou de façon à correspondre aux faits (comme pour *d)* et *e)*. Parmi les principes directeurs, nous ne pourrions reconnaître que celui de la symétrie [qui conduit au système de Gauss *a)*] et celui du nombre minimum d'unités (Giorgi).

Tous les systèmes et groupements considérés ici ont naturellement un caractère absolu.

[13]) Procès-Verbaux, loc. cit., p. 99.

Encore quelques remarques sur la résistance, qui est pour le praticien la grandeur la mieux appropriée à jouer le rôle d'un étalon. Le plan de Giorgi consistait 1° à ne prévoir qu'un nombre minimum d'unités et 2° à reconnaître à l'étalon de résistance le caractère d'une unité [14]). Le fait suivant est donc réellement singulier: La grandeur que l'on croit instinctivement pouvoir considérer comme la mieux apte à constituer la quatrième unité est de plus en plus délogée de sa position privilégiée par la poursuite conséquente du principe de l'absolu et du principe du nombre minimum d'unités. Elle finit par apparaître moins appropriée que μ du point de vue de l'exigence *b)* et (probablement) moins appropriée que I du point de vue de l'exigence *c)*. Enfin, l'ohm donne la fausse impression, en sa qualité d'unité fondamentale, qu'il s'agirait d'un groupement dans le sens de *d)* ou *e)*, ce qui n'est pas possible, comme nous venons de le voir. A cela vient s'ajouter encore le fait suivant: Si l'on voulait éviter la modification de $^1/_2$ ‰ de l'unité de résistance et ôter à la perméabilité sa valeur de priorité et la reléguer en second plan, la définition de l'unité de résistance par exemple devrait être équivalente à

$$[R] = 1{,}000\,500 \cdot 10^7 \cdot \mu_0\ [\mathrm{m^1 s^{-1}}],\ \mu_0 = 1$$

On ne pourrait pas introduire cette unité dans les équations de dimensions MKSΩ, bien qu'elle renferme elle-même les dimensions du mètre et de la seconde, sinon toutes les grandeurs spécifiquement électriques seraient liées aux unités MKS non seulement par des puissances décimales exactes, mais également par des puissances du facteur 1,000 500.

Pour supprimer cette faute d'élégance, on devrait poser $\mu_0 = 10^{-7}/p$, comme ce fut le cas lors de la création du système MKS actuel, c'est-à-dire ajouter l'encombrant facteur p à la perméabilité du vide, ou en d'autres termes définir explicitement une mesure pour la perméabilité. Mais alors la définition de l'ohm aurait à nouveau la forme

$$[R] = [\mathrm{m^1 s^{-1}}\ [\mu]^{\ 1}],\ \ [\mu] = p\mu_0$$

faisant ressortir nettement le caractère dérivé. *Par conséquent, la tendance d'éviter une modification de l'ohm ne peut pas concorder de façon satisfaisante avec le choix de l'ohm comme quatrième unité.*

En résumé, la constitution du système proposé peut se *motiver* comme suit:

Exigence du nombre minimum d'unités. En reconnaissant pleinement l'élégance du système de Gauss basé sur la symétrie — auquel on reviendra certainement toujours, lorsque l'on voudra faire ressortir la structure des phénomènes électromagnétiques — on a parfaitement raison de vouloir établir pour la pratique un système absolu cohérent

[14]) Procès-Verbaux, loc. cit., p. 331.

(évitant les dualités qui ne sont pas pratiquement utiles) avec un nombre minimum d'unités (Giorgi). Afin de tenir compte du fait que, dans la pratique courante, c'est l'électricité dynamique et non pas l'électricité statique qui présente le plus grand intérêt, on donnera la préférence à un système du type électromagnétique.

Suppression du facteur de transformation A. Dans la formule de Maxwell $c = A/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$, le facteur de transformation A est une conséquence de la dualité de la constitution, c'est-à-dire du choix indépendant de ε_0 et μ_0, aussi doit-on absolument chercher à supprimer ce signe de dualité en admettant A sans dimension $= 1$. On supprime ainsi la grandeur électrique la plus problématique et qui dépend plus que toutes les autres de l'interprétation.

Suppression du facteur de transformation pour l'énergie (puissance). Si l'on exprime le fait qu'il existe en électrodynamique une grandeur qui puisse être considérée comme équivalente à la puissance mécanique, en supprimant un facteur de transformation entre watt électrique et watt mécanique, le choix des unités libres est réduit à quatre.

La perméabilité, quatrième grandeur fondamentale du systme MKSμ absolu. Du fait qu'il n'y a actuellement aucune raison pour abandonner la longueur, la masse et le temps comme grandeurs mécaniques fondamentales, en particulier le mètre, le kilogramme et la seconde comme unités, il reste donc à choisir *une* grandeur spécifiquement électrique. Le médium servant dans toutes les relations électromagnétiques de membre intermédiaire entre le champ électrique (magnétique) et le corp d'essai mécanique, il s'ensuit que le médium est déterminant pour toutes les grandeurs spécifiquement électriques et magnétiques. On n'a donc aucune raison d'élever au rang de grandeur électrique fondamentale autre chose que la perméabilité.

Le vide, médium-étalon. Comme étalon électrique, la nature nous offre le vide.

Choix de l'unité. Pour unité $[\mu]$ de la perméabilité, il est recommandable de choisir par exemple $1{,}000\,500 \cdot 10^7$ fois la perméabilité μ_0 du vide. L'unité $[\mu]$ devrait être pourvue d'un nom et d'un symbole.

Commentaires: Le facteur $p = 1{,}000\,500 \cdot 10^7$ est analogue au rapport 1 : 86 400 dans la définition de la seconde et au rapport numérique entre le mètre (considéré comme étalon) et la longueur d'onde de la raie rouge du cadmium (considérée comme mesure naturelle de longueur). Une puissance décimale exacte n'offrirait ni avantage, ni désavantage. p ne se présente que dans les manuels, les travaux originaux sur les mesures absolues et dans les relations internes entre laboratoires nationaux.

Unités dérivées. La plupart des unités dérivées pratiques (ohm, henry, farad, ampère, volt, coulomb, weber) sont directement égales aux unités MKSμ absolues.

Substitution sans difficulté des unités absolues. Un avantage spécial de ce système est que les résistances étalonnées de cette façon ne s'écartent pas de plus de $^1/_{40}$ ‰ environ des résistances internationales étalonnées de la façon actuelle.

Date de la substitution des unités absolues. La précision absolue de $2 \cdot 10^{-5}$ atteinte par les mesures de résistance étant suffisante pour tous les besoins de la technique appliquée des mesures de précision, la substitution des unités absolues pourra avoir lieu dès que les mesures absolues du courant s'effectueront avec une précision suffisante pour que l'on puisse distribuer des éléments Weston d'une précision absolue satisfaisant à tous les besoins de la technique *appliquée* des mesures de précision.

Précision externe. Toutes les indications d'étalonnage sont données en valeurs absolues (excepté dans le cas de désirs spéciaux motivés), avec indication d'une incertitude *minimum* en valeur absolue fixée périodiquement par la Conférence Générale (actuellement $2 \cdot 10^{-5}$ pour l'ohm par exemple).

Précision interne. L'échange des expériences dans un même institut et entre le Bureau International de Sèvres et les Laboratoires nationaux se fait avec indication des valeurs relatives sensiblement plus précises. Ces valeurs relatives (c'est-à-dire les indications apposées sur les étalons) se modifient par de brusques écarts, toujours négligeables pour la technique appliquée des mesures de précision et devenant d'année en année plus petits. Ces valeurs sont également fixées périodiquement par la Conférence Générale.

Efforts communs de la Conférence Générale et de la CEI. Le système MKS$[\mu]$, résultat des efforts communs de la Conférence Générale des Poids et Mesures et de la CEI devrait être le seul système recommandé officiellement aux praticiens, car ce serait la seule manière de réaliser un grand progrès par rapport à l'état actuel de la question de l'unification. Le groupement descriptif, avec l'ampère comme unité de départ par exemple, devrait être désigné comme une possibilité *dérivée* du système MKS$[\mu]$, c'est-à-dire *subordonnée* à ce système, et utile pour certaines applications.