

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ,
SESSION DE 1935.

PROCÈS-VERBAUX DES SEANCES,
RAPPORT ET ANNEXES.

PRÉSIDENT

du Comité international des Poids et Mesures :

M. LE SÉNATEUR V. VOLTERRA.

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ.

Président :

M. PAUL JANET, Directeur de l'École supérieure et du
Laboratoire central d'Électricité.

Membres :

Pour la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, *Berlin* :
M. le Professeur H. VON STEINWEIR, Membre de la
Reichsanstalt.

Pour le National Bureau of Standards, *Washington* :
M. CRITTENDEN, Membre du National Bureau of
Standards.

Pour le National Physical Laboratory, *Teddington* :
M. J. E. SEARS, Superintendant de la Section de
Métrologie du National Physical Laboratory.

Pour le Laboratoire central d'Électricité, *Paris* : M. R. JOUAUST, Sous-Directeur du Laboratoire central.

Pour le Laboratoire électrotechnique, *Tokyo* : M. H. NAGAOKA, Professeur à l'Université.

Pour l'Institut de Métrologie et de Standardisation, *Lenin-grad* : M. ...

M. CH.-ÉD. GUILLAGME, Directeur du Bureau international des Poids et Mesures, *Sèvres*.

M. le Professeur L. LOMBARDI, Directeur du Laboratoire électrotechnique de l'École royale d'Ingénieurs, *Rome*.

Invités :

M. BRYLINSKI, Président du Comité électrotechnique français, 26, rue de La Baume, *Paris* (8^e).

M. A. E. KENNELLY, Professeur à l'Université Harvard, *Cambridge*, Mass.

Sir J. C. M^c LENNAN, Université de Toronto.

M. P. VIGOUREUX, Membre du National Physical Laboratory, *Teddington*.

M. A. PÉRARD, Sous-Directeur du Bureau international des Poids et Mesures, *Sèvres*.

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ.

SESSION DE 1935

PROCÈS-VERBAL

DE LA PREMIÈRE SÉANCE.

TENUE AU PAVILLON DE BRETEUIL.

le mardi 24 septembre 1935.

PRÉSIDENTENCE DE M. PAUL JANET.

Étaient présents : MM. CRITTENDEN, GUILLAUME, JOUAUST, LOMBARDI, NAGAOKA, SEARS, VON STEINWEHR, membres du Comité consultatif,

M. PÉRARD, Secrétaire.

M. BRYLINSKY, Sir J. C. M^c LENNAN, M. VIGOUREUX, invités.

Excusé parmi les invités : M. KENNELLY.

La séance est ouverte à 15^h 5^m.

M. le PRÉSIDENT souhaite la bienvenue à tous ses collègues présents, dont plusieurs ont accompli un long voyage, et aux invités dont les avis seront très utiles pour l'étude de certaines questions.

Il rappelle les conditions dans lesquelles le Comité consultatif se réunit aujourd'hui. C'est à la suite des vœux exprimés par ce Comité lui-même dans sa session

de 1933, approuvés par le Comité international des Poids et Mesures et entérinés en partie par la Conférence générale de 1933. Le premier de ces vœux est relatif à la substitution du système absolu au système international pour les unités électriques et à la fixation provisoire en 1935 du rapport entre chaque unité internationale et l'unité absolue correspondante. Le second vise surtout la création d'un Sous-Comité technique, chargé d'effectuer des comparaisons de résistances et d'éléments-étalons et d'en fixer la valeur en fonction des unités absolues. Enfin, un troisième vœu était relatif à la métastabilité des éléments-étalons au cadmium.

Le Sous-Comité technique aurait dû se réunir en 1935. Dès octobre 1934, M. JANET a consulté les Laboratoires nationaux sur l'opportunité de convoquer ce Sous-Comité en vue d'accomplir au moins la première partie de sa tâche. Le plus grand nombre d'entre eux fut d'avis d'ajourner cette réunion, étant donné l'état d'avancement de leurs travaux. Le 28 décembre, M. JANET prévenait les Laboratoires de cet ajournement, mais en ajoutant qu'il y avait lieu de prévoir une réunion du Comité consultatif d'Électricité quelques jours avant la session de 1935 du Comité international des Poids et Mesures. C'est cette réunion qui vient de s'ouvrir.

D'autre part, M. KENNELLY a informé en juillet M. JANET que la Commission électrotechnique internationale avait décidé à l'unanimité d'adopter pour les unités électriques le système M. K. S., dit système Giorgi, en laissant en suspens le choix de la quatrième unité fondamentale. L'Union internationale de Physique pure et appliquée a été également saisie de cette question, qui devra être examinée en détail par le Comité consultatif. Mais M. le PRÉSIDENT a l'impression que l'accord se fera facilement sur ce point.

Le Comité doit se donner pour tâche d'arriver le plus tôt possible à fixer les rapports entre les unités internationales et les unités absolues; ce but devrait être atteint en 1936. M. le PRÉSIDENT a préparé pour cette session un programme provisoire de travail. Il propose d'étudier les questions dans l'ordre suivant :

- A. Détermination de l'ohm en valeur absolue.
- B. Détermination de l'ampère en valeur absolue.
- C. Représentation actuelle des unités.
- D. Comparaison des unités nationales.
- E. Sous-Comité technique.
- F. Propositions de la Commission électrotechnique internationale.
- G. Questions diverses. Conclusions et vœux à présenter au Comité international des Poids et Mesures.

Des séances du Comité consultatif sont prévues pour le mercredi 25, le matin, les jeudi 26 et vendredi 27, le matin et l'après-midi, l'après-midi du mercredi étant réservé à une visite des nouvelles installations du Laboratoire central d'Électricité, à Malakoff.

Les travaux du Comité seront facilités par la remise à chacun de ses membres de nombreux travaux imprimés ou dactylographiés, dont M. le PRÉSIDENT donne la liste.

Ce programme de travail est approuvé à l'unanimité par les membres du Comité.

A. — DÉTERMINATION DE L'OHM EN VALEUR ABSOLUE.

M. PÉRARD donne successivement lecture des Rapports de trois Laboratoires nationaux : Physikalisch-Technische Reichsanstalt, National Physical Laboratory, Laboratoire électrotechnique de Tokyo, sur l'état d'avancement de leurs travaux relatifs à cette question. Il donne également

un aperçu des questions traitées dans un Mémoire imprimé de CURTIS, MOON et SPARKS sur le même sujet, et en lit quelques fragments (1).

M. le PRÉSIDENT remercie les auteurs de ces rapports, qui apportent une contribution de premier ordre au résultat que vise le Comité. C'est la première fois que des travaux de ce genre sont centralisés et discutés ensemble, ce qui aboutira certainement à de bien meilleurs résultats que s'ils avaient été publiés et discutés séparément.

M. JOUAUST fait remarquer qu'il est difficile de juger de la précision des travaux, car seul le Bureau of Standards donne une limite des erreurs probables. Le National Physical Laboratory est arrivé pour le rapport cherché à une valeur probable de 1,00049 et le Bureau of Standards à une valeur sensiblement définitive de 1,00045. Cette différence de 0,00004 provient sans doute de la différence des méthodes employées pour les mesures d'inductance : inductance mutuelle d'une part, self-inductance d'autre part. On ne peut tirer de conclusions définitives, mais il serait intéressant de se demander s'il n'y a pas de difficultés géométriques particulières à chaque méthode. Ainsi pour M. CURTIS, la mesure la plus délicate semble être celle du pas.

M. VIGOUREUX ne croit pas qu'il y ait de difficultés géométriques plus grandes dans une méthode que dans l'autre.

M. PÉRARD demande si la tension du fil, à la sortie de la filière, peut être considérée comme constante, et si une variation de la tension n'a pas d'inconvénients.

M. CRITTENDEN répond que la tension peut être considérée comme très constante.

(1) Voir ces Rapports, Annexes E1, E6, E8 et E3, p. 215, 253, 262 et 222.

M. le PRÉSIDENT fait remarquer que le Comité se trouve dès maintenant en possession de deux résultats à peu près définitifs, ceux du N. B. S. et du N. P. L. Il demande aux autres Laboratoires s'ils peuvent dès maintenant fixer la date où leurs travaux seront terminés. M. SEARS appuie cette demande.

M. VON STEINWEHR répond qu'il ne peut donner aucune précision en ce qui concerne la P. T. R.; M. NAGAOKA annonce que le Laboratoire électrotechnique de Tokyo espère avoir fini pour la fin de l'année.

B. — DÉTERMINATION DE L'AMPÈRE EN VALEUR ABSOLUE.

M. PÉRARD donne successivement lecture des Rapports de trois Laboratoires nationaux : P. T. R., N. P. L. et E. T. L. de Tokyo, sur l'état d'avancement des travaux sur ce sujet. Il rappelle le Mémoire imprimé de CURTIS et CURTIS sur la même question (1).

M. VON STEINWEHR fait remarquer que dans le Mémoire de M. CURTIS deux valeurs différentes de la correction due au volume d'enroulement peuvent être obtenues, selon qu'on utilise la largeur de la gorge ou le nombre de fils par couche multiplié par le diamètre extérieur du fil. C'est la raison pour laquelle, à la P. T. R., on songe à utiliser des enroulements constitués par la superposition de bandes.

M. CRITTENDEN répond que cette question présente une difficulté réelle, et qu'il peut y avoir un doute sur la grandeur de la correction à appliquer. C'est pourquoi le N. B. S. a fait construire deux autres types de bobines :

(1) Voir ces Rapports, Annexes E2, E7, E8 et E4, p. 220, 259, 268 et 238.

l'un ayant un enroulement à bande, comme celui de la P. T. R., l'autre constitué d'une seule couche de fil enroulé en hélice.

M. le PRÉSIDENT : La grosse différence de 0,00009 entre les résultats du N. B. S. et du N. P. L. proviendrait-elle de là ?

M. VIGOUREUX : Cela ne peut expliquer qu'une petite partie de l'écart, mais pas le tout.

M. JOUAUST attire l'attention du Comité sur un article récent, de Sir Richard GLAZEBROOK, paru dans les *Proceedings* de la Royal Society, qui traite cette question du volume de l'enroulement.

La séance est levée à 17^h.

PROCÈS-VERBAL

DE LA DEUXIÈME SÉANCE,

TENUE AU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ,

le mercredi 25 septembre 1935.

PRÉSIDENTIE DE M. PAUL JANET.

Présents : MM. CRITTENDEN, GUILLAUME, JOUAUST, LOMBARDI, NAGAOKA, SEARS, VON STEINWEHR.

Assistent également à la séance : MM. M^c LENNAN, PÉRARD, ROMANOWSKI, VIGOUREUX.

Excusé : M. KENNELLY.

La séance est ouverte à 9^h 30^m.

Le procès-verbal de la séance précédente est lu et adopté.

C. — REPRÉSENTATION ACTUELLE DES UNITÉS.

M. PÉRARD donne lecture du Rapport du National Physical Laboratory sur les matériaux pour la construction des étalons de résistance (1).

A la suite de cette lecture, M. PÉRARD demande comment on constate au N. P. L. la stabilité des étalons

(1) Annexe E6, p. 255.

de platine. Est-ce par la constance des différences entre les diverses bobines ?

M. VIGOUREUX : Il n'y a guère d'autre méthode. Le N. P. L. possède différentes bobines, les unes en platine pur, les autres en alliages divers. Seules les bobines en platine pur ont conservé entre elles des différences invariables. Ce n'est pas une preuve absolue de la constance, mais en tout cas une grande probabilité.

M. PÉRARD : Pour s'assurer autrefois de la constance des mètres étalons, on les a soumis à divers traitements : variations de température, vibrations prolongées au moyen d'un trembleur. N'y aurait-il pas lieu de faire des expériences analogues sur les bobines ?

M. VIGOUREUX : Ce serait un gros travail. Le N. P. L. préfère ne pas manipuler trop souvent ses bobines de platine, et les soumettre de temps à autre à des mesures absolues, pendant un intervalle de 50 ou 100 années.

M. LOMBARDI : Que sont devenues les unités préparées il y a une cinquantaine d'années par Sir Richard GLAZEBROOK ?

M. VIGOUREUX : On ne les considère plus comme suffisamment exactes. Elles avaient d'ailleurs été faites surtout pour se rendre compte si le platine était supérieur comme matériau.

M. LOMBARDI : Quelle est la nature de la manganine employée par le N. P. L. ? On a parlé aussi d'un nouvel alliage dont la résistance ne varierait que de quelques millièmes au bout de plusieurs années.

M. VIGOUREUX : Le N. P. L. emploie de la manganine ordinaire. Quelquefois, il a utilisé une variété connue sous le nom d'ohmal.

M. CRITTENDEN : Le N. B. S. se sert aussi de manganine ordinaire.

M. PÉRARD, répondant à la deuxième question de M. Lombardi, indique le mémoire de M. J.-L. Thomas (*Bur. of St., J. of Res.*, 13, 1934, p. 681), où il est question d'un alliage chrome-or parfaitement stable et à coefficient thermique très faible entre 20° et 30°.

M. VON STEINWEHR ajoute qu'à la P. T. R., en essayant différentes compositions, on est arrivé à un pourcentage pour lequel le coefficient thermique entre 20° et 30° est absolument nul.

M. PÉRARD : Dans les bobines du N. P. L., le fil de platine est porté sur de la silice. Si le contact est direct, n'y a-t-il pas possibilité de déformation et de changements de résistance par différence de dilatation ?

M. SEARS : Le fil est enroulé sans tension, et une déformation paraît exclue.

M. PÉRARD : Les précautions prises pour obtenir le millième de degré sont-elles suffisantes ? Il est en effet difficile de réaliser exactement le 0°, même dans la glace fondante.

M. VIGOUREUX : L'enroulement est placé dans un long tube, qui est entièrement plongé dans la glace. On opère de la même façon qu'avec des thermomètres.

M. VON STEINWEHR : Il serait préférable d'employer le point triple; les résultats sont beaucoup plus sûrs.

M. JOUAUST : N'y a-t-il pas d'ennuis possibles avec des couples thermo-électriques qui se développeraient dans les jonctions ?

M. VIGOUREUX : On se sert, pour les mesures, du pont

de Smith, qui élimine toutes les résistances jusqu'à la dérivation.

M. LOMBARDI : On peut encore se demander si la présence de l'eau lourde n'apporte pas de causes d'erreur; mais il ne semble pas que ce sujet ait été encore étudié.

M. PÉRARD lit le mémoire du Laboratoire électrotechnique de Tokyo sur les éléments-étalons ⁽¹⁾. Celui-ci ne donne lieu à aucune observation.

M. PÉRARD expose ensuite la question de l'adoption d'une température normale pour la définition des étalons électriques. Aucune décision n'a été prise jusqu'à présent à ce sujet. On s'est rallié en général à la température de 20°C.; mais le N. B. S. et l'E. T. L. semblent préférer 25°, probablement parce que la température moyenne normale dans leur pays est plus voisine de ce chiffre. M. PÉRARD apporte un nouvel argument en faveur de 20°C. : c'est à cette température qu'on a normalisé les étalons de longueur. Déjà on avait adopté 15°C. pour les longueurs d'onde; il ne serait pas très heureux de prendre une troisième valeur pour les unités électriques.

M. CRITTENDEN répond qu'en été il n'est pas pratique aux États-Unis de faire des mesures à 20°; mais le N. B. S. est prêt, si on le désire, à donner des valeurs des étalons pour la température de 20°C., en effectuant pour cela des mesures spéciales.

M. NAGAOKA : Au Japon, on préfère aussi 25° à cause du climat. Pendant trois semaines, par suite des chutes de pluie, l'air est saturé d'humidité, dont on se débarrasse en élevant la température.

⁽¹⁾ Annexe E 8, p. 273.

M. PÉRARD : On peut arriver au même résultat en utilisant des récipients à glace qui condensent l'humidité sur leurs parois. Ne pourrait-on prendre une décision relative à la température de 20°C., sous réserve de l'acquiescement ultérieur du Laboratoire de Tokyo, auquel on écrirait, pour lui exposer les raisons qui militent en faveur de ce choix.

M. NAGAOKA annonce qu'il a reçu des instructions qui l'autorisent à accepter la température de 20°, bien que son Laboratoire préfère 25°.

M. le PRÉSIDENT remercie M. NAGAOKA, et la proposition de M. PÉRARD est adoptée.

M. SEARS demande que cette décision ne vise que les éléments-étalons. Car, pour les ohms en platine, il faudrait conserver 0°.

M. PÉRARD voudrait que cette décision fût applicable aux ohms comme aux éléments-étalons.

M. le PRÉSIDENT : La décision précédente laisse toute liberté aux Laboratoires nationaux dans leur pays. On pourrait rédiger comme il suit la résolution :

« Résolution 4. — Pour les comparaisons internationales des étalons électriques, les valeurs communiquées seront celles qui correspondent à la température de 20°C., sauf exceptions justifiées. »

Cette proposition est adoptée.

D. — RAPPORTS DES UNITÉS NATIONALES.

M. PÉRARD résume une note de MM. PÉRARD et ROMANOWSKI ⁽¹⁾ sur les comparaisons effectuées au Bureau

⁽¹⁾ Annexe E 9, p. 279.

international entre les bobines de résistance des six grands Laboratoires nationaux; il y ajoute les résultats obtenus en 1935. Le rapport définitif ne pourra être rédigé qu'après réception des valeurs de l'U. R. S. S.

M. ROMANOWSKI résume le Rapport de MM. ROMANOWSKI et ROUX ⁽¹⁾ sur l'état actuel des comparaisons effectuées au Bureau international entre les étalons de force électromotrice des divers Laboratoires nationaux.

M. PÉRARD donne lecture de diverses Notes du Laboratoire de Tokyo sur : le mode et les formalités de transport des étalons électrotechniques, les boîtes de transport, les changements des étalons électriques causés par le transport ⁽²⁾.

M. JOUAUST fait remarquer que la valise diplomatique est la meilleure solution du problème du transport; car elle évite l'ouverture des colis pour les formalités de douane.

M. PÉRARD demande au Comité de voter un vœu à ce sujet, qui serait transmis au Comité international des Poids et Mesures et communiqué par lui aux Gouvernements.

M. JOUAUST appuie cette proposition, qui laisse d'ailleurs toute liberté aux Laboratoires qui préfèrent un autre mode de transport.

Cette proposition est adoptée.

« **RÉSOLUTION 2.** — *Le Comité consultatif demande au Comité international de vouloir bien voter un vœu qui serait transmis aux Gouvernements intéressés,*

⁽¹⁾ Annexe E 10, p. 291.

⁽²⁾ Voir ces Notes, Annexe E 8, p. 272.

» dans le but d'obtenir que les transports des instruments très délicats, et en particulier des étalons électriques, puissent être effectués par le moyen de la valise diplomatique, qui évite l'ouverture en douane, toute liberté étant d'ailleurs laissée aux laboratoires qui préféreraient un autre mode de transport. »

La séance est levée à 11^h30^m.

VISITE A L'ANNEXE
DU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ

LE MARCHÉ 25 SEPTEMBRE 1935,
A 14^h30^m.

Sur l'invitation de M. Paul JANET, les Membres du Comité se réunissent d'abord au Laboratoire central d'Électricité, pour entendre une communication de M. JOUAUST sur « les recherches entreprises au Laboratoire central d'Électricité, sur la détermination de l'ohm en valeur absolue ».

Le résumé de cette communication est donné en annexe (Annexe E 8, p. 250).

Puis les Membres du Comité sont transportés à Malakoff, à l'Annexe du Laboratoire central située dans les sous-sols de l'École supérieure d'Électricité, où se trouvent les installations décrites par M. JOUAUST. Celles-ci sont mises en fonctionnement devant les Membres du Comité, qui reçoivent toutes les explications désirées.

Cette visite est suivie d'une réception aimablement offerte par M. Paul JANET, dans la salle des séances du Conseil de l'École.

PROCÈS-VERBAL

DE LA TROISIÈME SÉANCE,

TENUE AU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ,

le jeudi 26 septembre 1935.

PRÉSIDENCE DE M. PAUL JANET.

Présents : MM. CRITTENDEN, GUILLAUME, JOUAUST, LOMBARDI, NAGAOKA, SEARS, VON STEINWEHR, Membres du Comité.

Assistent en outre à la séance : MM. M^cLENNAN, PÉRARD, ROMANOWSKI, VIGOUREUX, invités.

Excusé : M. KENNELLY.

La séance est ouverte à 10^h.

Le procès-verbal de la séance précédente est lu et adopté.

G. — QUESTIONS DIVERSES.

M. le PRÉSIDENT a reçu d'un collègue qui désire garder l'anonymat une série de propositions ⁽¹⁾ relatives à :

1^o Nouvelle manière internationale scientifique d'écrire et imprimer les symboles d'écartement décimal entre les chiffres;

⁽¹⁾ Voir ces propositions, Annexe n° 9, p. 137.

2^o Note sur un projet d'expression littérale et numérique des multiples et des sous-multiples;

3^o Projet d'expression littérale et numérique des fractions n pour 10^m partie d'une unité, étendue jusqu'à n pour million;

4^o Proposition invitant le Comité international des Poids et Mesures à adopter provisoirement le « mégon », comme nom abrégé du mégamètre ou million de mètres.

M. le PRÉSIDENT estime que ces propositions intéressent moins le Comité consultatif que le Comité international des Poids et Mesures, auquel elles devraient être transmises.

Ce point de vue, appuyé par M. SEARS, est adopté.

E. — SOUS-COMITÉ TECHNIQUE.

M. le PRÉSIDENT rappelle le vœu émis dans sa dernière session par le Comité consultatif au sujet de la création d'un Sous-Comité technique, en particulier les paragraphes II, III, IV (p. 60 des *Procès-Verbaux* de 1933) qui fixent la composition, les attributions et le programme de travail de ce Sous-Comité. La première partie de son travail (comparaison de résistances et d'éléments-étalons) pourrait s'effectuer dès maintenant. Y-a-t-il donc lieu de convoquer prochainement le Sous-Comité technique?

M. CRITTENDEN : Les deux parties du programme se tiennent; on n'a institué des comparaisons que dans le but de fixer ensuite les valeurs en unités absolues. Il ne faut donc pas dissocier les deux fonctions du Sous-Comité, qui ne sont qu'une seule.

M. le PRÉSIDENT : Une autre question se pose : La réunion aura-t-elle lieu à Breteuil? Et sera-ce une réunion

de discussions seulement, ou bien les membres feront-ils des expériences à Breteuil? C'est un point très important pour l'outillage du Bureau.

M. SEARS : Il y aura beaucoup de mesures à effectuer, et le Sous-Comité n'en pourra faire qu'une très petite partie. Sa fonction primaire sera donc de discuter les valeurs trouvées et de leur donner un poids.

M. CRITTENDEN exprime la même opinion.

M. PÉRARD fait d'ailleurs remarquer qu'en huit jours, durée probable de la réunion du Sous-Comité, il serait impossible de faire toutes les comparaisons nécessaires.

M. le PRÉSIDENT : Sur la date de la réunion du Sous-Comité, il y a une proposition précise du Japon, de juin à décembre 1936.

M. VON STEINWEHR : Lorsqu'à la première réunion du Comité consultatif, en 1928, la P. T. R. a consenti à changer les unités électriques, ce fut à la condition que cette transformation ne serait pas effectuée avant que la précision des mesures des unités absolues soit du même ordre que celle des unités internationales. Il n'estime pas que ce moment soit arrivé. Actuellement, la concordance des mesures de l'ohm absolu est de quelques cent-millièmes; pour l'ampère absolu, les valeurs diffèrent de presque un dix-millième. Par contre, la concordance pour l'ohm et pour l'ampère internationaux est de 1 ou 2 cent-millièmes. Étant donnée cette situation, M. VON STEINWEHR estime prématuré de fixer dès aujourd'hui une date pour la réunion du Sous-Comité technique. Il propose de laisser à M. le Président l'initiative, quand il sera d'avis qu'une précision suffisante des mesures aura été atteinte, de proposer par correspondance aux membres du Comité consultatif de convoquer le Sous-Comité.

M. JOUAUST : Il y a deux étapes à réaliser. Il ne subsiste que de faibles divergences entre les étalons internationaux. Les grands Laboratoires devraient s'entendre pour ramener à la même valeur l'ohm et le volt. Il suffirait de changer le chiffre du millionième pour que tout le monde soit d'accord. Ce serait déjà un grand progrès en ce qui concerne les unités internationales.

M. SEARS exprime un point de vue tout différent. Il y a un changement beaucoup plus considérable qui se présente : c'est celui des unités internationales en unités absolues, et il faut l'accomplir le plus tôt possible. Le reste viendra après.

M. VON STEINWEHR : Il faudra alors changer deux fois.

M. SEARS : Peut-être même plusieurs fois, à mesure que la précision des mesures croîtra.

M. JOUAUST propose de prendre pour l'ohm international la moyenne des valeurs des grands Laboratoires, sauf celle du Laboratoire central d'Électricité, qui s'en écarte le plus parce que les étalons ont été endommagés. Le Laboratoire central accepterait cette valeur moyenne et y rapporterait les valeurs de ses étalons.

M. le PRÉSIDENT : Il y aurait un intérêt évident à ce que tous les Laboratoires adoptent le même ohm international.

M. VIGOUREUX : Si l'on fait maintenant ces ajustements, il devrait être entendu qu'on pourra en faire ultérieurement d'autres quand on notera de nouvelles différences d'au moins $1/100000$.

M. JOUAUST : Quand le Bureau international observerait de nouvelles différences, il les communiquerait aux Laboratoires nationaux, qui agiraient en conséquence. Déjà plusieurs Laboratoires ont spontanément réajusté leur valeur de l'ohm dans le passé.

M. SEARS : La demande de M. VIGOUREUX doit s'appliquer à toutes les unités. Pour chacune, on doit insérer la clause de la faculté de révision.

M. le PRÉSIDENT : En somme, la majorité des membres du Comité n'est pas d'avis de réunir prochainement le Sous-Comité technique. Le Comité accepte-t-il la proposition de prendre pour l'ohm international la valeur moyenne des cinq grands Laboratoires, France non comprise ?

M. VON STEINWEHR accepte.

M. CRITTENDEN ne peut accepter sans en référer au N. B. S.

M. SEARS n'est pas partisan d'un changement jusqu'à l'adoption des unités absolues. Il est d'ailleurs obligé de se référer également à ses mandants.

M. LOMBARDI appuie fortement la proposition de M. JOUAUST. Si le Comité ne veut pas l'accepter, il pourrait tout au moins constater officiellement dès aujourd'hui la valeur moyenne des ohms des cinq grands Laboratoires.

M. ROMANOWSKI communique la valeur des écarts des ohms ⁽¹⁾ des cinq Laboratoires par rapport à cette moyenne à la date du 29 novembre 1933.

(¹) Les écarts analogues (par rapport à la moyenne des cinq mêmes Laboratoires) pour ce qui concerne le volt sont les suivants, à la date du 10 décembre 1934 :

P. T. R.....	— 4	millionièmes
N. B. S.....	— 12	»
N. P. L.....	+ 5	»
E. T. L.....	— 2	»
I. M. S.....	+ 13	»

l'écart du C. C. E. étant de..... — 76 »

A cette séance, il n'a été communiqué qu'une estimation approximative.

	A la date du 29 novembre 1933 (millionièmes).	A la date du 15 mars 1935 ⁽¹⁾ (millionièmes).
P. T. R.....	+ 10,5	+ 9,8
N. B. S.....	— 6,4	— 5,5
N. P. L.....	— 5,2	— 3,6
E. T. L.....	— 8,3	— 11,2
I. M. S.....	+ 9,5	+ 10,6
l'écart du L. C. E. étant de	+ 73,0	+ 69,5

M. CRITTENDEN : Les étalons du N. B. S. et du N. P. L. semblent n'avoir pas changé depuis longtemps. Si ceux d'un autre Laboratoire venaient à varier sensiblement, on serait amené à changer la valeur de ces étalons, alors qu'ils n'auraient pas varié, ce qui paraît peu admissible.

M. PÉRARD : En faisant la moyenne au Bureau international, on verrait facilement quel est le pays dont l'étalon présente une trop forte variation, et celui-ci pourrait imiter le geste du L. C. E. En attendant, si les Laboratoires autres que le N. B. S. et le N. P. L. voulaient se rallier à la moyenne, ce serait déjà un pas en avant.

M. SEARS : Si l'on admet la valeur moyenne, comme l'a proposé M. LOMBARDI, chaque pays aurait ensuite la latitude de prendre la décision qu'il voudrait.

M. VON STEINWEHR : Il serait très important pour tous les pays qui n'ont pas de grand Laboratoire, et qui sont nombreux, qu'il existe une seule valeur de l'ohm international.

MM. SEARS et CRITTENDEN désirent spécifier qu'il est

(¹) Les écarts à la date du 15 mars 1935 n'ont pu être calculés que quelques jours plus tard, après réception des valeurs de l'I. M. S., qui manquaient encore.

possible que leurs pays respectifs adoptent les nouvelles valeurs, mais qu'ils ne sont pas autorisés à voter sur ce point.

MM. JOUAUST et PÉRARD sont chargés de rédiger pour la séance de vendredi un projet de conclusion de ce débat.

M. le PRÉSIDENT : Quelle sera la date de la prochaine réunion du Comité consultatif ?

Après un échange de vues à ce sujet, le Comité adopte la résolution 3 :

« RÉSOLUTION 3. — *Le Comité consultatif décide de*
» *fixer d'abord au début de 1937, la réunion du Sous-*
» *Comité technique. Le Comité consultatif se réunira*
» *ensuite au cours de l'année, quelques jours avant la*
» *session ordinaire du Comité international des Poids*
» *et Mesures.* »

M. le PRÉSIDENT, agissant à titre officieux, désire profiter de la présence des délégués des différents Laboratoires pour rappeler qu'il existe aujourd'hui un Comité Consultatif de Photométrie distinct, dont il a accepté la présidence provisoire. Il n'a pas cru opportun de le réunir cette année. Quand serait-il bon de le faire ?

M. CRITTENDEN : Les travaux de ce Comité doivent commencer le plus tôt possible, parce qu'il serait désirable de prendre en même temps les décisions sur les unités électriques et sur les unités photométriques. Les délégués des États-Unis et du Japon, ayant à faire de très longs voyages, souhaitent que les deux Comités d'Électricité et de Photométrie se réunissent à la même époque, pour éviter deux déplacements successifs.

M. le PRÉSIDENT : En principe, le Comité de Photométrie se réunirait donc en 1937.

M. JOUAUST, agissant dans la circonstance comme secrétaire de M. JANET, veut bien prendre soin de rappeler aux Laboratoires nationaux les travaux dont ils se sont chargés en ce qui concerne la photométrie, avec la prière de les pousser activement.

M. SEARS appuie sur la nécessité d'entrer immédiatement en rapport avec ces Laboratoires, dans le but de formuler un programme précis de travaux à effectuer jusqu'au début de 1937.

La séance est levée à 11^h 30^m.

PROCÈS-VERBAL

DE LA QUATRIÈME SÉANCE,

TENUE AU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ,

le jeudi 26 septembre 1935.

PRÉSIDENTIE DE M. PAUL JANET.

Présents : MM. CRITTENDEN, GUILLAUME, JOUAUST, LOMBARDI, NAGAOKA, SEARS, VON STEINWEHR.

Assistent en outre à la séance : MM. BRYLINSKI, M^c LENNAN, PÉRARD, ROUX, VIGOUREUX.

La séance est ouverte à 14^h 40^m.

F. -- PROPOSITION

DE LA COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE.

M. le PRÉSIDENT rappelle la question posée par la C. E. I. Le 27 juin dernier, il a été informé par M. KENNELLY que cette Commission, après avoir adopté le système GIORGI, avait différé le choix de la quatrième unité fondamentale, jusqu'après consultation du Comité consultatif d'Électricité et de l'Union internationale de Physique pure et appliquée. Il serait en effet très regrettable que les physiciens et les électrotechniciens ne possèdent pas les mêmes unités. M. LOMBARDI a préparé un rapport sur la question et a demandé à M. JANET de porter celle-ci à l'ordre

du jour de la présente session de notre Comité. En toute rigueur, la communication de M. LOMBARDI aurait dû être adressée au Président du Comité international des Poids et Mesures, dont nous ne sommes que le conseiller sur les questions d'électricité. Nous pourrions dire que nous n'avons pas qualité actuellement pour discuter la question et qu'il faut attendre qu'elle nous soit renvoyée par le Comité international, préalablement saisi. Cependant, pour gagner du temps et d'accord avec M. VOLTERRA, M. le PRÉSIDENT propose d'ouvrir maintenant la discussion. Il rappelle les divers documents sur la question remis aux membres du Comité, en plus du Mémoire de M. LOMBARDI : Note de M. KENNELLY, Mémoire de Sir Richard GLAZEBROOK avec annexe, Note de M. CAMPBELL, Mémoire de M. GIORGI, Communications de MM. EMDE, WALLOT, BENNETT.

En somme, c'est un avis que demande la C. E. I., et sur un point très limité : choix d'une quatrième unité, électrique, dans le système M. K. S. Les opinions à ce sujet sont très partagées : certains recommandent la perméabilité du vide, d'autres le coulomb, d'autres encore l'ampère, etc. Au fond, cela n'a pas grande importance : quel que soit le choix, le résultat sera le même ; il faudra toujours arriver à la représentation des unités par des étalons.

M. CRITTENDEN, parlant au nom de M. KENNELLY, qui regrette de ne pouvoir être présent, exprime la crainte que si le Comité consultatif et le Comité international n'arrivent pas à donner une recommandation pour la quatrième unité, la C. E. I. pourrait bien, l'année prochaine, prendre une décision indépendante.

M. LOMBARDI demande qu'on tienne compte de deux choses. D'une part, la C. E. I. a craint que le choix de la

perméabilité du vide ne soit pas bien accueilli par les électriciens praticiens, et qu'il ne compromette la solution de la question de la rationalisation des unités. D'autre part, la C. E. I. travaille surtout pour le monde industriel, qui désire avoir un système d'unités auxquelles on puisse recourir en tous temps, et comparer toujours avec un étalon du Bureau international. On pouvait choisir entre les sept unités électriques (en dehors du joule et du watt); mais avant de se décider, la C. E. I. a voulu consulter deux organismes compétents, pour savoir quelle est la meilleure, ne voulant pas s'arrêter à la proposition qui a été faite de prendre l'ensemble des sept unités. Elle a cru aussi que le Comité consultatif trouverait un intérêt à créer des étalons pour ces unités, au moins pour certaines d'entre elles. La C. E. I. ne se reconnaît pas de pouvoir officiel pour imposer des unités. D'ailleurs la Conférence générale des Poids et Mesures s'est prononcée en substituant le système absolu au système international. La question est donc tranchée que le système cherché doit être le système absolu ou un système compatible avec celui-ci. La quatrième unité sera par conséquent une unité absolue. Laquelle? Toutes sont équivalentes, au point de vue théorique; mais nous visons surtout ici un résultat pratique. Or l'unité de résistance est certainement la plus pratique et la plus susceptible de mesures absolues.

M. BRYLINSKY : Il est bien entendu que dans le système M. K. S. toutes les unités électriques seront conservées; mais l'une sera considérée comme fondamentale, et les autres comme dérivées. On a surtout proposé comme unité fondamentale : la perméabilité du vide, la résistance électrique, la quantité d'électricité et l'intensité de courant. Le choix de la définition de l'unité de perméabilité dépend d'une question non résolue, celle de la rationali-

sation; il y a donc intérêt à ne pas la prendre. D'autre part, c'est une notion mal définie au point de vue physique; il n'est même pas certain que la perméabilité magnétique du vide soit constante. L'unité de résistance présente deux inconvénients : 1° toutes les grandeurs électriques auront des exposants fractionnaires dans les formules de dimensions; 2° pour obtenir les unités dérivées, il faut passer par la formule de Joule, c'est-à-dire par des mesures calorimétriques encore peu exactes. La quantité d'électricité (coulomb) serait plus logique, au point de vue théorique; mais la mesure du dépôt d'argent est délicate. La question est d'ailleurs écartée, du moment qu'on renonce aux unités internationales pour adopter les unités absolues; car on n'a plus alors de définition directe de la quantité d'électricité. Enfin l'intensité du courant (ampère) paraît l'unité la plus désignée : théoriquement, elle se rattache directement à la quantité d'électricité; pratiquement, c'est l'une des grandeurs qu'on peut le mieux reproduire.

M. SEARS : Il faut faire une distinction très nette entre *unité* et *étalon*. Quelquefois, nous avons un étalon fondamental qui sert à définir l'unité. Mais en général l'unité est une question théorique, tandis que l'étalon répond aux besoins de la pratique; l'unité ne doit donc pas dépendre de l'étalon. Nous avons pris la décision de substituer le système absolu au système international; dès lors les étalons deviennent seulement des représentants de l'unité théorique. La perméabilité ne doit pas être considérée comme une unité; c'est une propriété de l'espace. Si l'on adopte le système absolu, on peut dire que les trois unités : mètre, kilogramme, seconde, prises en conjonction avec la valeur 10^{-7} pour la perméabilité, constituent un système complet. Aucune unité n'est plus fondamentale que

l'autre. Il peut être avantageux pour un système théorique d'avoir une unité qui serve de point de départ. Sur ce point, il est d'accord avec M. BRYLINSKI sur les avantages de l'ampère. C'est lui qui donne les équations dimensionnelles avec les puissances entières. En ce qui concerne la rationalisation, la question n'est pas difficile à résoudre; il suffit de donner les deux formules pour les systèmes rationalisés et non rationalisés et de laisser la liberté du choix.

M. VON STEINWEHR : Le point de vue qui nous importe surtout, c'est le point de vue pratique. Or le choix de l'ohm paraît préférable, parce qu'il peut être représenté par un étalon et que c'est l'unité la plus facile à mesurer.

Sir J. C. M^c LENNAN : Dans une question de cet ordre, il peut y avoir d'une part une définition théorique, de l'autre une unité pratique, représentée par un étalon avec lequel on fait les mesures.

M. le PRÉSIDENT communique quelques opinions qui lui ont été envoyées par lettres : Sir Richard GLAZEBROOK, Président de la Commission S. U. N., et Sir Joseph PETAVAL, au nom du Comité exécutif du N. P. L., recommandent, comme quatrième unité, la perméabilité du vide prise comme égale à $1 \cdot 10^{-7}$. M. A. COTTON préconise au contraire l'ampère; c'est une ancienne unité internationale; sa détermination est facile et peut être très précise. A défaut, il opterait pour la quantité d'électricité.

M. le PRÉSIDENT prie chaque membre de donner son avis sur la quatrième unité.

M. SEARS : La perméabilité du vide.

M. CRITTENDEN : De même, mais c'est une opinion personnelle; car il n'est pas autorisé à voter sur cette question.

M. VON STEINWEHR : L'ohm, défini par le système absolu, la perméabilité n'étant pas une unité, mais une propriété.

M. NAGAOKA s'abstient.

M. LOMBARDI : L'ohm absolu.

M. GUILLAUME : La perméabilité du vide.

M. JOUAUST : La perméabilité, définie comme égale à 10^{-7} C. G. S.

M. JANET : La perméabilité.

M. le PRÉSIDENT : Il y a une majorité en faveur de la perméabilité.

M. LOMBARDI : La demande d'avis de la C. E. I. excluait la faculté de choisir la perméabilité, qu'elle avait déjà écartée pour les raisons indiquées. A ce sujet, M. LOMBARDI avait rédigé une ébauche de résolution dont il donne lecture.

M. le PRÉSIDENT procède alors à une deuxième consultation, en priant les membres de désigner l'unité qu'ils préfèrent, la perméabilité du vide étant écartée. Les avis sont les suivants :

M. SEARS : L'ampère.

M. CRITTENDEN : L'ampère.

M. VON STEINWEHR : L'ohm.

M. NAGAOKA : abstention.

M. GUILLAUME : L'ohm.

M. LOMBARDI : L'ohm.

M. JOUAUST : L'ohm.

M. JANET : L'ampère.

M. le PRÉSIDENT résume ainsi le débat : Si la perméabilité avait été comprise dans le choix proposé par la C. E. I., une majorité importante du Comité consultatif

se serait déclarée pour elle. La perméabilité ayant été écartée, le Comité s'est partagé entre l'ohm et l'ampère, avec une légère majorité en faveur de l'ohm.

MM. JOUAUST et PÉRARD sont chargés de préparer, pour la prochaine séance, un projet de rédaction à soumettre au Comité international.

La séance est levée à 16^h 30^m.

PROCÈS-VERBAL

DE LA CINQUIÈME SÉANCE,

TENUE AU PAVILLON DE BRETEUIL,

le vendredi 27 septembre 1935.

PRÉSIDENCE DE M. PAUL JANET.

Présents : MM. CRITTENDEN, GUILLAUME, JOUAUST, LOMBARDI, NAGAOKA, SEARS, VON STEINWEHR.

Assistent également à la séance : MM. M^c LENNAN, PÉRARD, VIGOUREUX.

La séance est ouverte à 15^h.

Le procès-verbal des deux séances précédentes est lu et adopté.

M. PÉRARD lit le projet de résolution rédigé par M. JOUAUST et lui-même au sujet de l'unification des valeurs du volt et de l'ohm internationaux.

Après une modification demandée par M. SEARS, M. le PRÉSIDENT met ce texte aux voix. Il est adopté à l'unanimité sous la forme suivante :

« *RÉSOLUTION 4. — Le Comité consultatif d'Électricité*
» *cité enregistre avec satisfaction la décision prise par*
» *le Laboratoire central d'Électricité, de modifier dès*
» *maintenant la grandeur de son unité de résistance*

» électrique, et celle de son unité de force électromotrice, des quelques cent-millièmes à peine, nécessaires pour faire coïncider l'une et l'autre avec les moyennes des unités de même nom, telles qu'elles sont conservées dans les cinq autres grands Laboratoires nationaux : *Physikalisch-Technische Reichsanstalt*, *National Physical Laboratory*, *National Bureau of Standards*, *Laboratoire électrotechnique de Tokyo*, *Institut de Métrologie de l'U. R. S. S.*

» Le Comité consultatif :

» considérant alors l'extrême petitesse des écarts qui subsisteraient entre la valeur de l'unité-ohm et celle de l'unité-volt de chacun de ces cinq Laboratoires d'une part, et les deux moyennes ci-dessus mentionnées d'autre part, le plus fort écart, tant pour l'ohm que pour le volt, n'atteignant guère que 11 millionièmes, et considérant le grand intérêt que présenterait une unification très prochaine des unités électriques de tous les pays, suggère aux divers Laboratoires, chacun en ce qui le concerne, et dès que la possibilité s'en ouvrira, d'adopter pour grandeur de l'ohm et pour grandeur du volt respectivement les valeurs définies par les moyennes ci-dessus. »

M. PÉRARD lit ensuite le projet, rédigé par M. JOUAUST et lui-même, de réponse à la Commission électrotechnique internationale, au sujet du choix de la 4^e unité dans le système M. K. S., réponse destinée à être communiquée au Comité international des Poids et Mesures. En voici le texte :

« **RÉSOLUTION 5 a.** — *Le Comité consultatif d'Électricité, sur une question de la Commission électrotechnique internationale, relative au choix le plus convenable d'une unité électrique dans le sys-*

» tème M. K. S., fait tout d'abord observer qu'en vertu du règlement de son institution, il ne peut correspondre qu'avec le Comité international des Poids et Mesures. Néanmoins, après consentement du Président du Comité international, il a décidé d'examiner la question posée, l'avis émis par lui devant être présenté à ce Comité, qui a seul qualité pour répondre.

» Le Comité consultatif croit d'abord devoir signaler qu'une majorité importante parmi ses membres présents a manifesté l'opinion que la liaison entre les unités mécaniques et les unités électriques devrait être assurée en attribuant la valeur 10^{-7} dans un système M. K. S. non rationalisé, ou $4\pi \cdot 10^{-7}$ dans un système rationalisé, à ce qu'on est convenu d'appeler la perméabilité du vide.

» Sur la remarque que la forme dans laquelle la question a été posée limitait le choix aux sept unités pratiques : *Coulomb*, *Ampère*, *Volt*, *Ohm*, *Henry*, *Farad*, *Weber*, le Comité, à l'unanimité, a estimé que le choix ne peut se porter que sur l'ampère, défini comme étant le dixième de l'unité électromagnétique C. G. S. de courant, ou sur l'ohm, défini comme étant 10^9 fois l'unité électromagnétique de résistance C. G. S., ces deux grandeurs étant en concordance avec les valeurs 10^{-7} ou $4\pi \cdot 10^{-7}$ indiquées ci-dessus pour la perméabilité du vide.

» En définitive, le Comité s'est prononcé en faveur du choix de l'ohm, à la faible majorité de 4 voix, contre 3 attribuées à l'ampère, et 1 abstention. »

Avant l'adoption de ce texte, M. SEARS demande à préciser sa position dans cette question. Après la discussion de la veille, il a pensé qu'il serait utile d'appro-

fondir davantage la question. Les idées des membres du Comité sur les unités et les étalons lui ont paru n'être pas exactement les mêmes. Peut-être pourrait-on s'accorder sur les bases suivantes. En supprimant le système international, il faut lui substituer un système bien défini. Or, on n'a pas donné de définitions précises du système absolu, qui doit le remplacer, et de ses unités. Le projet de mémorandum dont il donne lecture (projet inclus dans la Résolution 5 b. ci-après), vise à atteindre ce but.

M. le PRÉSIDENT remercie M. SEARS de ce texte très clair et qui constitue une contribution extrêmement importante à la question débattue. S'il avait pu être présenté à la séance de la veille, la décision du Comité en eût sans doute été modifiée. Il propose de suspendre la séance pour permettre aux membres d'examiner plus à fond le texte de M. SEARS et d'échanger leurs idées à ce sujet.

À la reprise de la séance, M. le PRÉSIDENT annonce que le mémorandum de M. SEARS, avec le concours de quelques membres, en particulier MM. JOUAUST, LOMBARDI, PÉRARD et VIGOREUX, a subi quelques légères retouches et a été mis au point sous la forme indiquée à la Résolution 5 b. ci-dessous.

M. LOMBARDI demande sous quelle forme le projet de résolution de MM. JOUAUST et PÉRARD et le mémorandum de M. SEARS vont être transmis au Comité international des Poids et Mesures, le second paraissant revenir sur les conclusions du premier.

M. PÉRARD demande qu'il soit en tout cas spécifié que les résolutions adoptées n'impliquent aucune supériorité du système M. K. S. sur les autres systèmes d'unités déjà adoptés légalement dans divers pays.

M. SEARS fait remarquer qu'en s'associant au choix d'une

quatrième unité, le Comité a implicitement accepté le système M. K. S. pour ce qui concerne les unités électriques. Mais le système M. K. S. est essentiellement le même que le système C. G. S.; il n'y a qu'une différence de puissance de 10. Ainsi nous ne lui conférons aucune supériorité, ni ne manifestons aucune préférence explicite.

Après un nouvel échange de vues, le Comité adopte le projet de réponse ci-dessus à la C. E. I. Cette réponse sera suivie de la déclaration suivante :

RÉSOLUTION 5 b. — *Dans la séance qui a suivi, M. SEARS a présenté au Comité consultatif le document ci-après* ⁽¹⁾ :

⁽¹⁾ Au cours des séances du Comité international des Poids et Mesures, M. SEARS a demandé — et il lui a été accordé — la permission d'apporter au début de cette Note quelques additions, en conformité des idées que lui avait communiquées dans l'intervalle Sir Richard GLAZEBROOK; ces additions ne changent pas le sens général de la Note. En tête, a été ajouté, avec le n° 1, le paragraphe suivant :

« 1. La théorie électromagnétique conduit à la relation
» $A^2 = \mu_0 k_0 c^2$ entre les quatre quantités qui y interviennent, dont c est la vitesse de la propagation des ondes électromagnétiques dans le vide, μ_0 la perméabilité magnétique du vide, k_0 le pouvoir inducteur du vide (permittivity), A un coefficient constant.

» Pour avoir un système théorique complet des unités électriques, il faut fixer indépendamment les valeurs de deux des trois quantités A , μ_0 et k_0 . La troisième sera alors aussi fixée, par la relation ci-dessus. »

Le paragraphe 1 a pris le n° 2.

À la fin du paragraphe 2, qui a pris le n° 3, a été ajoutée la phrase suivante :

« Dans chacun de ces systèmes, le coefficient A est pris comme une constante purement numérique, à laquelle on attribue la valeur 1; ainsi, il ne figure plus dans les équations. Les principales unités de ces deux systèmes M. K. S. seraient alors les mêmes que celles du système pratique, dont la Conférence générale de 1933 a sanctionné l'adoption. »

Les paragraphes 3 à 7 ont pris les n° 4 à 8.

On trouve d'ailleurs le texte définitif de cette Note dans les *Procès-Verbaux* du Comité international (Annexe n° 1, p. 93).

« 1. Les grandeurs des unités électriques du système dont la Conférence générale de 1933 a sanctionné l'adoption sont identiques à celles des unités pratiques dérivées du système classique de Maxwell, dit C. G. S.

» 2. Ces systèmes sont basés essentiellement sur la conception d'une valeur constante pour la perméabilité du vide; cette valeur, dans le système de Maxwell, étant numériquement égale à 1. Pour le système M. K. S. non rationalisé, cette perméabilité devrait avoir la valeur de 10^{-7} , et pour le système M. K. S. rationalisé, la valeur $4\pi \cdot 10^{-7}$.

» 3. Les diverses unités électriques peuvent toutes être dérivées de cette conception, au moyen d'équations représentant les lois de la physique, avec des constantes convenablement choisies. En principe, aucune de ces unités n'a priorité sur les autres.

» 4. Les définitions adoptées pour les principales unités électromagnétiques pourraient être les suivantes :

» a. AMPÈRE. — L'ampère est le courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles rectilignes de longueur infinie, placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produit entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ unité M. K. S. de force, par mètre de longueur.

» b. COULOMB. — Le coulomb est la quantité d'électricité transportée chaque seconde par un courant d'un ampère.

» c. VOLT. — Le volt est la différence de potentiel électrique entre deux points d'un fil conducteur transportant un courant constant d'un ampère lorsque la

puissance dissipée entre ces points est égale à une unité M. K. S. de puissance (watt).

» d. OHM. — L'ohm est la résistance électrique entre deux points d'un conducteur, lorsqu'une différence de potentiel constante d'un volt, appliquée entre ces points, produit dans ce conducteur un courant d'un ampère, ce conducteur n'étant le siège d'aucune force électromotrice.

» e. WEBER. — Le weber est le flux magnétique qui, traversant un circuit d'une seule spire, y produirait une force électromotrice d'un volt si on l'amenait à zéro en une seconde par une décroissance uniforme.

» f. HENRY. — L'henry est l'inductance d'un circuit fermé dans lequel une force électromotrice d'un volt est produite lorsque le courant électrique qui traverse le circuit varie uniformément à raison d'un ampère par seconde.

» g. FARAD. — Le farad est la capacité électrique d'un condensateur entre les armatures duquel apparaît une différence de potentiel électrique d'un volt lorsqu'il est chargé d'une quantité d'électricité d'un coulomb.

» 5. Ces unités peuvent être dérivées comme suit :

Ampère.....	I	Ampère.....	I
Coulomb.....	Q	Ampère-seconde.....	IT
Volt.....	E	Watt par ampère.....	PI ⁻¹
Ohm.....	R	Volt par ampère.....	EI ⁻¹
Weber.....	Φ	Volt-seconde.....	ET
Henry.....	ℒ	Volt-sec. par ampère.	ETI ⁻¹
Farad.....	C	Ampère-sec. par volt.	E ⁻¹ TI

» 6. Pour la pratique courante des mesures de laboratoire, au moins deux étalons primaires de référence

sont nécessaires, et doivent être convenablement choisis entre les diverses unités. Les deux étalons de référence devraient être l'ohm et le volt, dont le premier est réalisé sous forme de bobines, et le second sous forme d'éléments Weston.

» 7. *Pour les questions théoriques, telles que les équations dimensionnelles reliant les diverses unités, l'unité la plus convenable comme point de départ pour la dérivation du système entier des unités électromagnétiques paraît être l'ampère, qui se rattache directement par des relations simples, aussi bien avec la base fondamentale du système qu'avec les autres grandeurs électriques et magnétiques, et qui, de plus, a l'avantage d'éliminer les puissances fractionnaires dans les équations dimensionnelles. A cet égard, l'ampère devrait être préféré comme la quatrième unité, nécessaire pour compléter le système M. K. S. des unités électromécaniques.* »

Ce document a trouvé un accueil unanimement favorable auprès du Comité consultatif, qui a décidé de le transmettre au Comité international, sans toutefois estimer nécessaire de revenir sur le vote émis la veille.

M. le PRÉSIDENT : Il reste au Comité à désigner un rapporteur, qui résumera l'ensemble de ses travaux pour la session qui va s'ouvrir au Comité international.

M. VON STEINWEHR propose M. JOUAUST. M. SEARS appuie cette proposition.

M. JOUAUST est nommé rapporteur du Comité à l'unanimité.

M. le PRÉSIDENT demande l'autorisation d'approuver le

procès-verbal de la dernière séance, autorisation qui lui est accordée.

M. le PRÉSIDENT, avant de clore la session, tient à remercier M. PÉRARD et ses collaborateurs de toute la peine qu'ils se sont donnée pour l'organisation de la session, en particulier pour leurs nombreux travaux de traduction.

M. LOMBARDI remercie M. le PRÉSIDENT de la façon pleine de tact et de courtoisie dont il remplit toujours ses fonctions, et rappelle que la C. E. I. l'a nommé récemment Président d'Honneur.

La séance est levée à 18^h15^m.

QUATRIÈME RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES,

Par M. R. JOUAUST, Rapporteur.

Sur convocations adressées par le Bureau international des Poids et Mesures et signées du Président M. Paul Janet, le Comité consultatif d'Électricité s'est réuni à Paris du 24 septembre au 27 septembre 1935.

A cette quatrième session, tenue sous la présidence de M. Paul Janet, assistaient : MM. Crittenden, Guillaume, Jouaust, Lombardi, Nagaoka, Sears, von Steinwehr, membres du Comité consultatif.

Assistaient, en outre, en qualité d'invités : MM. Brylinski, Mac Lennan, Vigoureux, Pérard, Romanowski, Roux.

M. Kennelly, également invité, s'était excusé pour raison de santé.

En ouvrant la session, M. Paul Janet, président, après avoir souhaité la bienvenue aux membres du Comité, a cru devoir rappeler dans quelles conditions avait été organisée la réunion actuelle.

A sa dernière session, sur un vœu émis par le Comité consultatif, le Comité international avait décidé :

Que le Comité consultatif demanderait que les Laboratoires représentés dans son sein désignassent des membres destinés à composer un Sous-Comité technique chargé d'effectuer des comparaisons de résistances et d'éléments étalons avec toute la précision nécessaire, et d'en fixer les valeurs en fonction des unités absolues ;

Que le Sous-Comité technique se réunirait au Bureau international des Poids et Mesures dans le courant de 1935 ;

Que les décisions du Sous-Comité seraient examinées par le Comité consultatif avant d'être transmises au Comité international.

Pour se conformer à cette décision du Comité international, M. Janet est entré en relation dans le dernier trimestre de 1934 avec les Directeurs des Laboratoires nationaux représentés au Comité consultatif, leur demandant la désignation d'un membre pour le Sous-Comité technique et des propositions pour la date à fixer pour ce Sous-Comité.

La majorité des réponses fut : que les travaux entrepris dans les divers laboratoires pour la détermination des unités absolues n'étaient pas assez avancés pour permettre d'attribuer aux étalons usuels des laboratoires des valeurs en fonction du système absolu ; que, dans ces conditions, le travail des membres du Sous-Comité technique se bornerait à des intercomparaisons entre les étalons des divers laboratoires et serait peu utile, ces intercomparaisons étant suffisamment assurées par les transports d'un laboratoire à un autre, ou leur envoi au Bureau international des Poids et Mesures.

Dans ces conditions, M. Janet a cru devoir surseoir à la réunion du Sous-Comité technique, et se borner à réunir le Comité consultatif quelques jours avant le Comité international.

Cette réunion avait pour but de permettre d'examiner l'état d'avancement des travaux pour la détermination des

unités absolues, de discuter la précision des méthodes employées de façon à faire profiter chacun de l'expérience acquise par ses collègues.

La question de la réalisation des étalons secondaires, en particulier la nature du métal à employer pour la construction des étalons secondaires de l'ohm, la question de la température à laquelle devaient être étudiés ces étalons, seraient aussi à examiner.

Toutefois, M. Janet insista sur la nécessité qu'il y aurait lieu à la présente session de fixer si possible la date de la réunion du Sous-Comité technique et son programme de travail. La fixation de cette date était en particulier réclamée dans une note reçue de l'Electrotechnical Laboratory de Tokio.

M. Janet signala, en outre, qu'il avait été avisé par M. Kennelly, que la Commission électrotechnique internationale avait adopté le système M. K. S., dit système Giorgi, comportant la fixation, outre les trois unités classiques de longueur, de masse et de temps, d'une quatrième unité fondamentale se rapportant à une grandeur électrique, et que la Commission électrotechnique désirerait avoir l'opinion du Comité consultatif sur la grandeur électrique dont il conviendrait de fixer l'unité.

M. Janet, sous certaines réserves, a cru devoir porter la question à l'ordre du jour du Comité consultatif, un rapport préparé par M. Lombardi, membre du Comité consultatif et de la Commission électrotechnique internationale, devant servir de base à la discussion.

Nous passerons maintenant en revue les travaux du Comité consultatif.

I. — UNITÉS ABSOLUES.

Deux laboratoires seulement ont terminé leurs travaux, ce sont le National Bureau of Standards et le National Physical Laboratory, et un seul de ces travaux a fait l'objet d'une publication complète, c'est la détermination de l'ampère, faite au N. B. S. par MM. H. et R. Curtis.

Les autres laboratoires (Physikalisch-Technische Reichsanstalt, Electrotechnical Laboratory, Laboratoire central d'Électricité) se sont bornés à présenter quelques notes sur les méthodes employées. Le représentant de l'Electrotechnical Laboratory, M. Nagaoka, a fait savoir que cet établissement pourrait d'ici peu fournir le résultat de ses mesures. Une semblable affirmation n'a pu être donnée par les représentants de la P. T. R. et du L. C. E.

a. Valeur absolue de l'unité de résistance. — Le National Bureau of Standards donnait le résultat suivant :

$$1 \text{ ohm international N. B. S.} = 1,000\,450 \text{ ohm absolu.}$$

La détermination de l'ohm absolu avait été faite au National Physical Laboratory par deux méthodes :

La méthode de Lorenz donnant

$$1 \text{ ohm international N. P. L.} = 1,000\,50 \pm 0,000\,02 \text{ ohm absolu.}$$

La méthode de Campbell

$$1 \text{ ohm international N. P. L.} = 1,000\,47 \pm 0,000\,02 \text{ ohm absolu.}$$

De l'opinion du représentant du N. P. L., étant donnée la précision des deux méthodes, il convenait de prendre la

moyenne des deux nombres ci-dessus et d'admettre comme résultats du N. P. L.

$$1 \text{ ohm international N. P. L.} = 1,000\,49 \text{ ohm absolu.}$$

Tels sont les seuls résultats communiqués d'une façon définitive au Comité consultatif; la concordance étroite, de l'ordre de quelques millièmes, entre l'ohm international N. P. L. et l'ohm international N. B. S. rend ces résultats directement comparables.

Toutefois le représentant de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt a fait savoir que certaines corrections devaient être apportées aux anciennes mesures de Grüneisen et Giebe, corrections qui conduisaient au résultat suivant :

$$\text{ohm international P. T. R.} = 1,000\,49 \text{ ohm absolu.}$$

Tous ces résultats semblent indiquer qu'on peut espérer que le rapport de l'ohm international à l'ohm absolu sera connu, lorsque tous les laboratoires auront terminé leurs travaux avec une précision de $\pm 2 \times 10^{-5}$.

b. Valeur absolue de l'unité d'intensité de courant. — Comme nous l'avons dit, deux laboratoires seulement, le N. B. S. et le N. P. L., ont terminé leurs travaux.

Les résultats obtenus, pour lesquels nous conservons la forme sous laquelle ils ont été présentés au Comité, sont les suivants :

Bureau of Standards :

$$1 \text{ ampère international B. S.} = 0,999\,926 \text{ ampère absolu;}$$

National Physical Laboratory :

$$1 \text{ ampère absolu} = 1,000\,14 \text{ ampère international N. P. L.}$$

Si l'on tient compte de la différence qui existe entre la réalisation de l'ampère international dans les deux labo-

ratoires, ces résultats divergent de 9 cent-millièmes.

La concordance est donc moins bonne dans la détermination de l'unité d'intensité de courant que dans la détermination de l'unité de résistance.

La discussion des méthodes de mesure employées provoqua une intéressante observation du représentant de la P. T. R. sur la difficulté de calculer dans la balance de lord Rayleigh la correction due au volume de l'enroulement des bobines. Il fit remarquer que dans le travail de H. et R. Curtis, il était possible de trouver deux valeurs différentes pour cette correction suivant la façon d'apprécier les dimensions des enroulements.

Il fut fait allusion à un travail récent de sir Richard Glazebrook paru récemment dans les *Proceedings of the Royal Society* ⁽¹⁾ et mettant en évidence la même difficulté.

M. von Steinwehr signala en outre que pour remédier à cette difficulté, on avait renoncé à la Reichsanstalt à constituer les bobines de la balance de lord Rayleigh par des fils enroulés, qu'on en avait construit dont l'enroulement était réalisé par des bandes. La nécessité de recommencer sur ces nouvelles bobines les mesures du rapport des rayons était une des causes, pour lesquelles la Reichsanstalt n'avait pu encore fournir de résultats.

M. Crittenden reconnut l'exactitude de la remarque de M. von Steinwehr et indiqua qu'au N. B. S. on avait entrepris, pour l'électrodynamomètre du type lord Rayleigh de cet établissement, la construction de nouvelles bobines, l'une constituée par des bandes, l'autre à une seule couche de fil.

En tout cas, il semble bien que cette incertitude sur une correction n'explique pas complètement la différence entre le N. B. S. et le N. P. L.

(1) *Proc. Roy. Soc., A.*, vol. 150, 1935, p. 487.

Le Comité, tout en exprimant ses regrets de constater les difficultés techniques qui retardaient l'exécution de sa tâche, ne put que se féliciter d'avoir, en se réunissant, provoqué une discussion fertile en enseignements pour tous ceux qui s'occupent de la détermination des unités électriques en valeur absolue.

II. — REPRÉSENTATION ACTUELLE DES UNITÉS.

La valeur de l'ohm international est conservée dans les laboratoires au moyen de bobines de manganin. La résistance de ces bobines n'est pas constante, elle varie lentement en fonction du temps.

Est-il possible de trouver pour la réalisation de ces bobines un métal ne donnant pas de semblables variations?

Un rapport du National Physical Laboratory, que M. Vigoureux commenta et développa devant le Comité, rendait compte des expériences tentées dans cet établissement pour la réalisation d'étalons de l'ohm en platine.

La construction de ces résistances est analogue à celle des thermomètres à résistance de platine.

Étant donnée la valeur du coefficient de variation de la résistivité du platine en fonction de la température, ces résistances doivent être utilisées à une température bien déterminée, pratiquement celle de la glace fondante.

M. Pérard attira l'attention du Comité sur la difficulté qui doit exister pour amener exactement de semblables résistances à la température de la glace fondante. M. von Steinwehr dit quelques mots sur l'emploi du triple point.

Quoi qu'il en soit, de nombreuses années doivent s'écouler avant qu'on puisse être fixé sur la constance de ces résistances.

Le Comité dut donc se borner à féliciter le National Physical Laboratory du travail entrepris.

Des questions furent posées au représentant du Bureau of Standards sur un nouvel alliage étudié dans cet établissement. M. von Steinwehr signala que des études avaient été faites également à la P. T. R. sur cet alliage chrome-or, et qu'il avait été possible d'en obtenir des échantillons dont le coefficient de température entre 20 et 30°C. était presque nul.

Mais on n'a encore que peu de renseignements sur la stabilité de cet alliage; et il sera nécessaire pendant longtemps encore de construire en manganin les étalons secondaires de l'ohm.

Aussi le Comité écouta-t-il avec intérêt les explications de M. Vigoureux sur le procédé employé au N. P. L. pour chercher à réaliser des étalons dont la résistance soit aussi constante que possible.

Une bonne part des variations manifestées par ces résistances est attribuée à la couche de gomme laque qui les recouvre.

Au N. P. L., le fil de manganine, enroulé sous la forme qu'il doit occuper sur le noyau qui le supporte, est recuit à 500°, traité à l'acide, puis placé sur le noyau sans subir aucune déformation mécanique. La couche de gomme laque, qui doit protéger le fil contre l'action du bain de pétrole dans lequel il est plongé, est aussi mince que possible.

III. — COMPARAISON DES ÉTALONS DES DIVERS LABORATOIRES.

M. Pérard attira tout d'abord l'attention sur la question de la température de définition des étalons. Dans les pays européens, cette température est de 20°; mais aux États-Unis et au Japon, elle est de 25°.

M. Pérard demandait de fixer cette température, et proposait la valeur de 20°.

MM. Crittenden (États-Unis) et Nagaoka (Japon) signalèrent que dans leur pays la température était souvent voisine de 25°. Ils mirent en évidence la difficulté qu'il y aurait à maintenir les étalons à une température plus basse que la température ambiante. Ils acceptèrent néanmoins pour les étalons utilisés dans les comparaisons internationales d'indiquer les valeurs à 20°C.

Cet accord fut sanctionné par une résolution (*voir* à la fin du rapport la Résolution n° 1).

Le transport des étalons d'un laboratoire à un autre présente des difficultés.

Dans une note envoyée au Comité, l'Electrotechnical Laboratory de Tokyo décrivait les boîtes qu'il utilisait pour le transport des piles étalons.

Mais certains représentants de laboratoire signalèrent les difficultés que leur avaient suscitées les administrations douanières et demandèrent s'il ne serait pas possible d'utiliser la valise diplomatique pour le transport des étalons destinés aux comparaisons internationales.

Il fut décidé de demander au président du Comité international des Poids et Mesures, les démarches nécessaires pour que les étalons destinés aux comparaisons internationales fussent acceptés dans les valises diplomatiques (Résolution n° 2).

MM. Pérard, Romanowski et Roux rendirent compte des comparaisons faites au Bureau international des Poids et Mesures des étalons de résistance et de force électromotrice des laboratoires représentés au sein du Comité.

Ces résultats sont concrétisés en prenant pour moyenne des unités la moyenne des unités des six laboratoires et en indiquant la différence entre les unités de chaque laboratoire et cette moyenne.

Le représentant du Laboratoire central, M. Jouaust, constata que ce sont les unités de l'établissement auquel

il appartient qui s'écartaient le plus, surtout en ce qui concerne l'unité de résistance, de la valeur moyenne.

La cause de ces écarts, de l'ordre de 7 cent-millièmes, ne lui a du reste pas échappé. Comme il s'agit d'une cause accidentelle il annonce que le Laboratoire central a l'intention de modifier la valeur de ses étalons de façon à la faire coïncider avec la moyenne des cinq autres laboratoires.

En faisant intervenir uniquement ses cinq valeurs dans l'établissement de la moyenne, on arrive par exemple pour les différences entre les unités de résistance des divers laboratoires et cette moyenne aux résultats suivants :

	A la date du 15 mars 1935.
P. T. R.....	+ 9,8 millièmes
N. B. S.....	- 5,5 »
N. P. L.....	- 3,6 »
E. T. L.....	- 11,2 »
U. R. S. S.....	+ 10,6 »

Ces différences sont petites; elles laissent néanmoins subsister des écarts dont il convient de tenir compte dans certains cas. Aussi M. Jouaust demanda si les divers laboratoires ne pourraient suivre l'exemple donné par le Laboratoire Central et modifier la valeur de leur unité dans un but d'uniformisation (1).

Cette proposition rencontra quelque opposition. La valeur des unités devant être modifiée prochainement

(1) Pour ce qui concerne le volt, les écarts calculés dans les mêmes conditions sont, à la date du 10 décembre 1934 :

P. T. R.....	- 4 millièmes
N. B. S.....	- 12 »
N. P. L.....	+ 5 »
E. T. L.....	- 2 »
U. R. S. S.....	+ 13 »

pour être exprimée en unités absolues, certains membres du Comité estimaient qu'il serait préférable d'attendre cette date pour procéder à l'uniformisation demandée.

D'autres ne se considéraient pas comme mandatés pour accepter une modification si légère fût-elle de l'étalon de leur pays.

Néanmoins le Comité finit par adopter la Résolution n° 4.

IV. — FIXATION DE LA DATE DE LA RÉUNION DU SOUS-COMITÉ TECHNIQUE.

Le Président, M. Paul Janet, rappela le vœu émis dans sa dernière session par le Comité consultatif.

Il insista sur la nécessité qu'il y aurait à fixer la date de ce Sous-Comité, rappelant que le Japon propose que cette date soit fixée entre juin et décembre 1936. Il demanda également aux membres du Comité de bien vouloir préciser quel serait exactement le rôle de ce Sous-Comité.

Tous les membres furent d'avis que les deux parties du programme indiquées pour ce Sous-Comité sont inséparables et que les comparaisons qui figurent au programme n'ont été instituées que dans le but de fixer ensuite les valeurs en unités absolues.

On ne peut donc dissocier les deux fonctions du Comité.

Les membres reconnurent unanimement qu'il serait impossible de réunir le Sous-Comité pendant un temps assez long pour que ses membres procédassent eux-mêmes à toutes les comparaisons nécessaires. Ils ne pourront en effectuer que quelques-unes. Le principal rôle du Sous-Comité sera donc de discuter les valeurs trouvées et de leur donner un poids.

La fixation de la date du Sous-Comité technique

donna lieu à quelques remarques de M. von Steinwehr qui voudrait laisser au Président le soin de fixer cette date lorsqu'il estimerait suffisant l'état d'avancement des travaux des divers laboratoires. Finalement, on décida de fixer cette date au début de 1937 (Résolution n° 3).

V. — EXAMEN DE LA QUESTION POSÉE PAR LA COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE RELATIVE AU SYSTÈME M. K. S.

En ouvrant la séance, le président M. Janet rappela dans quelles conditions il a cru devoir saisir les membres du Comité consultatif de la question posée.

Le Comité consultatif a été créé pour renseigner le Comité international des Poids et Mesures sur les questions touchant aux étalons du domaine électrique et des domaines annexes.

En conseillant un autre organisme, il sortirait du rôle qui lui a été attribué.

C'est donc au Comité international qu'aurait dû être adressée la question de la Commission électrotechnique internationale.

Mais il est à peu près évident qu'avant de répondre, le Comité international aurait voulu connaître l'avis du Comité consultatif. Or la réunion de celui-ci ayant précédé celle du Comité international, si la question était purement et simplement transmise au Comité international, la consultation du Comité consultatif serait impossible avant un temps assez long.

Dans ces conditions, avec l'approbation de M. Volterra, président du Comité international, M. Janet a cru pouvoir porter la question à l'ordre du jour du Comité consultatif, étant bien entendu que l'avis émis sera transmis au

Comité international, qui seul a qualité pour répondre.

Le Président posa aux membres du Comité consultatif la question de savoir s'ils approuvaient la procédure qu'il propose.

Cette procédure fut adoptée à l'unanimité.

Par contre, le Comité consultatif renvoya au Comité international une série de propositions qui concernent des questions de notation et de nomenclature.

Le Comité procéda ensuite à l'examen de la question posée par la C. E. I.

Cette question est exposée dans un mémoire remis par M. Lombardi. D'autre part les membres du Comité étaient en possession de divers documents sur ce sujet et émanant de sir Richard Glazebrook, et de MM. Kennelly, Campbell, Giorgi, Emde, Wallot et Bennett.

M. Lombardi fit un exposé commentant son Mémoire. De cet exposé résulte que le système M. K. S., sous la forme originale, conçue par M. Giorgi et fortement appuyée par M. Campbell, doit comporter quatre unités fondamentales, dont trois seulement, le mètre, le kilogramme et la seconde, furent indiquées à l'origine; la quatrième doit être maintenant fixée de façon à permettre d'incorporer dans un système cohérent les unités pratiques bien connues de courant, quantité d'électricité, force électromotrice, capacité, résistance, inductance et flux d'induction. MM. Giorgi et Campbell ont proposé de choisir comme quatrième unité l'ohm international, en raison du grand nombre d'étalons déjà existants; mais leur proposition ne pouvait pas être retenue par la Commission électrotechnique internationale, après la décision du Comité international des Poids et Mesures, ratifiée par la Conférence générale de 1933, de substituer le système absolu au système international.

La C. E. I. n'a pas cru non plus pouvoir adopter

comme telle la perméabilité du vide, qui n'a pas substantiellement les caractères d'une unité. n'est pas susceptible d'être représentée par des étalons, et prend des valeurs différentes dans les systèmes M. K. S. rationalisé et non rationalisé, entre lesquels un choix définitif n'a pas encore été fait par entente internationale. C'est pourquoi la C. E. I. a cru devoir borner le choix aux sept unités pratiques déjà nommées, qui, du point de vue théorique, sont équivalentes entre elles, et qui, devant se relier au système absolu C. G. S., sont nécessairement rapportées à la valeur unitaire de la perméabilité du vide. Ayant égard à la facilité de la construction et de la comparaison des étalons, M. Lombardi a manifesté dans son mémoire une certaine préférence pour l'unité de résistance, sans méconnaître que, parmi les autres unités, certaines pourraient jouir d'avantages comparables, et que la création d'un étalon primaire ne pourrait être envisagée que d'une façon approximative, bien suffisante pour la pratique, sans être affectée de l'invariabilité absolue qu'on attribue aux autres unités fondamentales de longueur, masse et temps, choisies d'une façon arbitraire, et représentées, en partie conventionnellement, par des étalons concrets déposés au Pavillon de Breteuil.

M. Janet attira l'attention du Comité sur l'opinion de sir Richard Glazebrook, président de la S. U. N., émettant nettement l'opinion que la 4^e unité devait être la perméabilité magnétique du vide à laquelle dans le système M. K. S. on attribuerait la valeur de 10^{-7} de telle façon que les unités électriques du système M. K. S. fussent les unités pratiques du système absolu. Il donna également lecture d'une lettre de sir Joseph Petavel lui annonçant que la Commission exécutive du National Physical Laboratory s'est ralliée à cette solution.

M. Sears fit remarquer qu'en s'associant au choix d'une

quatrième unité à la demande de la C. E. I., le Comité acceptait implicitement le système M. K. S. pour ce qui concerne les unités électriques. Mais le système M. K. S. est essentiellement le même que le système C. G. S., il n'y a qu'une différence de puissance de 10. Ainsi le Comité ne conférerait aucune supériorité et ne manifesterait aucune préférence.

Après une longue discussion le Comité se prononça, à une importante majorité, pour l'adoption de la perméabilité du vide comme unité fondamentale, M. Nagaoka représentant le Japon s'étant abstenu. M. Crittenden précisa que son opinion était émise à titre personnel.

Sur la remarque de M. Lombardi que la solution indiquée par le Comité avait été écartée par la C. E. I. et que le Comité ne devait se prononcer que sur le choix d'une des sept unités indiquées plus haut, le Président consulta de nouveau le Comité sous la forme suivante : Si la solution consistant à fixer la valeur de la perméabilité magnétique du vide doit être écartée, de quelle unité électrique proposeriez-vous d'introduire la définition dans le système M. K. S. ?

A la faible majorité de quatre voix contre trois et une abstention, le Comité se prononça pour l'ohm après protestation d'un des membres au sujet de la limitation imposée à l'avis demandé par la forme de la question posée par la C. E. I.; et finalement un projet d'avis rédigé par MM. Pérard et Jouaust et dont on trouvera le texte à la fin du présent rapport fut approuvé par le Comité (Résolution § a).

Au lendemain de cette discussion, M. Sears donna lecture d'une note qu'il avait rédigée. Sur une question de l'un des membres, il expliqua que les données du paragraphe § (voir page 213) ne représentent qu'un système de dérivations idéales, choisi parmi beaucoup d'autres

possibles et qu'il ne fallait pas regarder ce système de dérivation comme fixant d'une façon définitive les procédés à suivre dans la réalisation pratique des étalons.

Il indiqua à titre d'exemple la possibilité de déduire pratiquement toutes les unités électriques de la réalisation d'une inductance.

Les propositions de M. Sears, qui ne mettaient pas le Comité en opposition avec ses décisions antérieures, furent fort appréciées des membres qui exprimèrent l'opinion que la note de M. Sears, dont on trouvera plus loin le texte (Résolution 5 b), fût transmise au Comité International en même temps que l'avis précédemment émis.

VI. — VISITES.

Les membres du Comité furent invités par M. Janet à visiter les salles du Laboratoire central d'Électricité, où sont poursuivies les recherches sur les unités électriques, et à examiner le dispositif en cours de réalisation pour la détermination de l'ohm en valeur absolue.

Le Comité avant de se séparer vota des remerciements à M. Janet pour la façon dont il avait dirigé les débats, et à M. Pérard pour les soins qu'il avait pris pour assurer le bon fonctionnement de la réunion, en particulier pour assurer la communication en temps utile des documents nécessaires aux travaux du Comité. M. Jouaust, du Laboratoire central d'Électricité, fut désigné comme rapporteur pour la session de 1935.

RÉSOLUTIONS

VOTÉES PAR LE COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ DANS SA SESSION DE SEPTEMBRE 1935.

Résolution 1. — Pour les comparaisons internationales des étalons électriques, les valeurs communiquées seront celles qui correspondent à la température de 20°C., sauf exceptions justifiées.

Résolution 2. — Le Comité consultatif demande au Comité international de vouloir bien voter un vœu qui serait transmis aux Gouvernements intéressés, dans le but d'obtenir que les transports des instruments très délicats, et en particulier des étalons électriques, puissent être effectués par le moyen de la valise diplomatique, qui évite l'ouverture en douane, toute liberté étant d'ailleurs laissée aux laboratoires qui préféreraient un autre mode de transport.

Résolution 3. — Le Comité consultatif décide de fixer d'abord au début de 1937 la réunion du Sous-Comité technique. Le Comité consultatif se réunira ensuite au cours de l'année, quelques jours avant la session ordinaire du Comité international des Poids et Mesures.

Résolution 4. — Le Comité consultatif d'Électricité enregistre avec satisfaction la décision prise par le Laboratoire central d'Électricité de modifier dès maintenant la grandeur de son unité de résistance électrique, et celle de son unité de force électromotrice, des quelques cent-millièmes à peine, nécessaires pour faire coïncider l'une et l'autre avec les moyennes des unités de même nom, telles qu'elles sont conservées dans les cinq autres grands laboratoires nationaux : Physikalisch-Technische Reichsanstalt, National Physical Laboratory, National Bureau of Standards, Laboratoire Électrotechnique de Tokyo, Institut de Métrologie de l'U. R. S. S.

Le Comité consultatif :

Considérant alors l'extrême petitesse des écarts qui subsis-

teraient entre la valeur de l'unité-ohm et celle de l'unité-volt de chacun de ces cinq laboratoires d'une part, et les deux moyennes ci-dessus mentionnées, d'autre part, — le plus fort écart tant pour l'ohm que pour le volt n'atteignant guère que 11 millièmes —.

Et considérant le grand intérêt que présenterait une unification très prochaine des unités électriques de tous les pays,

Suggère aux divers laboratoires, chacun en ce qui le concerne, et dès que la possibilité s'en ouvrira, d'adopter pour grandeur de l'ohm et pour grandeur du volt respectivement les valeurs définies par les moyennes ci-dessus.

Résolution 5 a. — Le Comité consultatif d'Électricité, sur une question de la Commission électrotechnique internationale, relative au choix le plus convenable d'une unité électrique dans le système M. K. S., fait tout d'abord observer qu'en vertu du règlement de son institution, il ne peut correspondre qu'avec le Comité international des Poids et Mesures. Néanmoins, après consentement du Président du Comité international, il a décidé d'examiner la question posée, l'avis émis par lui devant être présenté à ce Comité, qui a seul qualité pour répondre.

Le Comité consultatif croit d'abord devoir signaler qu'une majorité importante parmi ses membres présents a manifesté l'opinion que la liaison entre les unités mécaniques et les unités électriques devrait être assurée en attribuant la valeur 10^{-7} dans un système M. K. S. non rationalisé, ou $4\pi \cdot 10^{-7}$ dans un système rationalisé, à ce qu'on est convenu d'appeler la perméabilité du vide.

Sur la remarque que la forme dans laquelle la question a été posée limitait le choix aux sept unités pratiques : Coulomb, Ampère, Volt, Ohm, Henry, Farad, Weber, le Comité, à l'unanimité, a estimé que le choix ne peut se porter que sur l'ampère, défini comme étant le dixième de l'unité électromagnétique C. G. S. de courant, ou sur l'ohm, défini comme étant 10^9 fois l'unité électromagnétique de résistance C. G. S., ces deux grandeurs étant en concordance avec les valeurs 10^{-7} ou $4\pi \cdot 10^{-7}$ indiquées ci-dessus pour la perméabilité du vide.

En définitive, le Comité s'est prononcé en faveur du choix de l'ohm, à la faible majorité de 4 voix, contre 3 attribuées à l'ampère, et 1 abstention.

Résolution 5 b. — Dans la séance qui a suivi, M. Sears a présenté au Comité consultatif le document ci-après (1) :

« 1. Les grandeurs des unités électriques du système dont la Conférence générale de 1933 a sanctionné l'adoption sont identiques à celles des unités pratiques dérivées du système classique de Maxwell, dit C. G. S.

« 2. Ces systèmes sont basés essentiellement sur la conception d'une valeur constante pour la perméabilité du vide; cette valeur, dans le système de Maxwell, étant numériquement égale à 1. Pour le système M. K. S. non rationalisé, cette perméabilité devrait avoir la valeur de 10^{-7} , et pour le système M. K. S. rationalisé, la valeur $4\pi \cdot 10^{-7}$.

(1) Au cours des séances du Comité international des Poids et Mesures, M. Sears a demandé, et il lui a été accordé, la permission d'apporter au début de cette Note quelques additions, en conformité des idées que lui avait communiquées dans l'intervalle Sir Richard Glazebrook; ces additions ne changent pas le sens général de la Note. En tête a été ajouté, avec le n° 1, le paragraphe suivant :

« 1. La théorie électromagnétique conduit à la relation $A^2 = \mu_0 k_0 c^2$ entre les quatre quantités qui y interviennent, dont : c est la vitesse de la propagation des ondes électromagnétiques dans le vide, μ_0 la perméabilité magnétique du vide, k_0 le pouvoir inducteur du vide (permittivity) et A un coefficient constant.

« Pour avoir un système théorique complet des unités électriques, il faut fixer indépendamment les valeurs de deux des trois quantités A , μ_0 et k_0 . La troisième sera alors aussi fixée, par la relation ci-dessus. »

Le paragraphe 1 a pris le n° 2.

A la fin du paragraphe 2, qui a pris le n° 3, a été ajoutée la phrase suivante :

« Dans chacun de ces systèmes, le coefficient A est pris comme une constante purement numérique, à laquelle on attribue la valeur 1; ainsi, il ne figure plus dans les équations. Les principales unités de ces deux systèmes M. K. S. seraient alors les mêmes que celles du système pratique dont la Conférence générale de 1933 a sanctionné l'adoption ».

Les paragraphes 3 à 7 ont pris les n° 4 à 8.

On trouvera d'ailleurs le texte définitif de cette Note en Annexe des *Procès-Verbaux* du Comité international, p. 93.

» 3. Les diverses unités électriques peuvent toutes être dérivées de cette conception, au moyen d'équations représentant les lois de la physique, avec des constantes convenablement choisies. En principe, aucune de ces unités n'a priorité sur les autres.

» 4. Les définitions adoptées pour les principales unités électromagnétiques pourraient être les suivantes :

» *a. Ampère.* — L'ampère est le courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles rectilignes de longueur infinie, placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produit entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ unité M. K. S. de force par mètre de longueur.

» *b. Coulomb.* — Le coulomb est la quantité d'électricité transportée chaque seconde par un courant d'un ampère.

» *c. Volt.* — Le volt est la différence de potentiel électrique entre deux points d'un fil conducteur transportant un courant constant d'un ampère, lorsque la puissance dissipée entre ces points est égale à une unité M. K. S. de puissance (watt).

» *d. Ohm.* — L'ohm est la résistance électrique entre deux points d'un conducteur, lorsqu'une différence de potentiel constante d'un volt appliquée entre ces points produit, dans ce conducteur, un courant d'un ampère, ce conducteur n'étant le siège d'aucune force électromotrice.

» *e. Weber.* — Le weber est le flux magnétique qui, traversant un circuit d'une seule spire, y produirait une force électromotrice d'un volt si on l'amenait à zéro en une seconde par une décroissance uniforme.

» *f. Henry.* — L'henry est l'inductance d'un circuit fermé dans lequel une force électromotrice d'un volt est produite, lorsque le courant électrique qui traverse le circuit varie uniformément à raison d'un ampère par seconde.

» *g. Farad.* — Le farad est la capacité électrique d'un condensateur entre les armatures duquel apparaît une différence de potentiel électrique d'un volt, lorsqu'il est chargé d'une quantité d'électricité d'un coulomb.

» 5. Ces unités peuvent être dérivées comme suit :

Ampère.....	I	Ampère.....	I
Coulomb.....	Q	Ampère-seconde.....	IT
Volt.....	E	Watt par ampère.....	PI ⁻¹
Ohm.....	R	Volt par ampère.....	EI ⁻¹
Weber.....	Φ	Volt-seconde.....	ET
Henry.....	ℒ	Volt-sec. par ampère.	ETI ⁻¹
Farad.....	C	Ampère-sec. par volt.	E ⁻¹ TI

» 6. Pour la pratique courante des mesures de laboratoire, au moins deux étalons primaires de référence sont nécessaires, et doivent être convenablement choisis entre les diverses unités. Les deux étalons de référence devraient être l'ohm et le volt, dont le premier est réalisé sous forme de bobines, et le second sous forme d'éléments Weston.

» 7. Pour les questions théoriques, telles que les équations dimensionnelles reliant les diverses unités, l'unité la plus convenable comme point de départ pour la dérivation du système entier des unités électromagnétiques paraît être l'ampère, qui se rattache directement par des relations simples, aussi bien avec la base fondamentale du système qu'avec les autres grandeurs électriques et magnétiques, et qui, de plus, a l'avantage d'éliminer les puissances fractionnaires dans les équations dimensionnelles. A cet égard, l'ampère devrait être préféré comme la quatrième unité, nécessaire pour compléter le système M. K. S. des unités électromécaniques. »

Ce document a trouvé un accueil unanimement favorable auprès du Comité consultatif, qui a décidé de le transmettre au Comité international, sans toutefois estimer nécessaire de revenir sur le vote émis la veille.

ANNEXE E 1.

Physikalisch-Technische Reichsanstalt.

ÉTAT DES TRAVAUX

CONCERNANT

LA COMPARAISON DE L'OHM ABSOLU
AVEC L'OHM INTERNATIONAL

DE LA PHYSIKALISCH-TECHNISCHE REICHSANSTALT

(1935).

Comme l'ont montré les mesures de von Steinwehr et Schulze, on ne doit pas considérer comme suffisamment bien définie la valeur prise comme base des mesures publiées en 1921 par Grüneisen et Giebe; car cette valeur était la moyenne de quatre résistances étalons comparées aux tubes ohmiques, dont les dimensions avaient changé avec le temps. En partant de la nouvelle valeur de la moyenne des bobines, on doit ajouter une correction d'au moins $2/100000$ pour obtenir un chiffre valable à l'époque des mesures. En effet, on admet comme résultat de ces mesures

$$1 \text{ ohm int.} = 1,00049 \text{ ohm absolu.}$$

Toutefois on n'est pas en mesure d'indiquer cette correction avec une sécurité suffisante. Dès qu'à la session du Comité consultatif de Paris, en novembre 1928, il eut été décidé de remplacer l'ohm international par une approximation de l'ohm absolu à la hauteur des progrès actuels de la précision en métrologie, la Physikalisch-Technische Reichsanstalt eut à entreprendre une nouvelle détermination du rapport des deux unités de résistance. Cette recherche est également désirable pour déterminer avec quelle approximation la valeur trouvée en 1921 pour le rapport indiqué est reproductible. Cette tâche a été entreprise avec

tous les perfectionnements de la métrologie correspondant à l'amélioration des instruments. Le travail consiste en principe à déterminer le coefficient de self-induction d'un étalon d'inductance, géométriquement bien défini, par deux procédés différents : le premier en valeur absolue, le second par rattachement à l'ohm international. Le quotient des deux résultats doit donner le rapport cherché.

Un enroulement cylindrique à une seule couche de fil de cuivre nu a été disposé, avec toute la précision imaginable, sur un noyau en une matière invariable. D'une part, la bobine est mesurée avec le maximum de précision, d'après ses dimensions géométriques (diamètre, pas, nombre de spires, longueur de l'enroulement et épaisseur du fil); d'autre part, son coefficient de self-induction est déterminé par un procédé électrique de façon à atteindre la même précision relative (quelque 10^{-6}).

On a repris sensiblement le procédé de mesure utilisé précédemment (pont de Maxwell pour la comparaison des capacités avec des inductances). On détermine la self-induction d'après la valeur de deux résistances et d'un condensateur, dont la capacité est mesurée en valeur absolue à l'aide d'un interrupteur rotatif, c'est-à-dire qu'elle est rapportée à un temps et à une résistance. Les résistances sont rapportées à l'étalon de résistance international.

Le calcul de la self-induction d'après les dimensions géométriques de l'enroulement de la bobine fournit celle-ci en unités absolues. Pour les calculs, on a adopté, en plus de la formule classique de Lorenz avec la correction de Rosa, la formule de Ch. Snow nouvellement établie pour une spirale cylindrique (*N. B. S. Scientific Papers*, 21, 1926, p. 431). Au lieu du noyau de bobine en marbre employé autrefois, on a établi un noyau en quartz; le coefficient de température plus faible permet ainsi de négliger la température de la bobine dont la détermination exacte avec les bobines en marbre soulève des difficultés. Un deuxième noyau, en marbre, est destiné à permettre des comparaisons. Les deux noyaux reçoivent un enroulement de fil de cuivre, directement sur leur surface, rodée en cylindre exact, et non pas comme autrefois dans une surface fileté; car les surfaces cylindriques se laissent plus exactement mesurer que les filetages. Un dispositif d'enroulement approprié a déjà été construit pour le bobinage précis sous tension des spirales de fil (de façon qu'aucun relâchement ne risque de se produire lors des oscillations de la température).

De plus le noyau de la bobine, aussi bien que le fil de cuivre, ont été exactement étudiés sous le rapport de leurs dimensions géométriques (*voir Note II b*) et sous le rapport de leurs propriétés magnétiques. Les deux noyaux, aussi bien que le fil de cuivre, se révèlent comme faiblement diamagnétiques; cependant la valeur numérique de cette influence doit être très minime. Le montage du pont a été amélioré sur quelques points, en particulier par l'emploi d'un galvanomètre électriquement accordable et plus sensible. On a entrepris plusieurs séries de mesures pour étudier les divers instruments. Pour mettre à profit l'augmentation de sensibilité du galvanomètre à vibrations lorsque la fréquence diminue, on projette de faire les mesures avec des fréquences plus faibles que celles utilisées jusqu'ici.

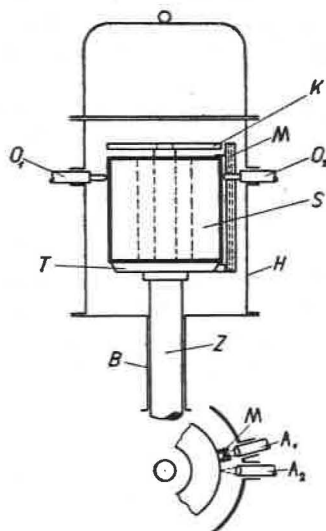
La mesure absolue des capacités d'après Maxwell-Thomson exige une très grande fixité de la fréquence de l'interrupteur, qui était obtenue jusqu'ici au moyen d'un régulateur centrifuge sensible. Cette fixité est maintenant assurée, en commandant le moteur de l'interrupteur au moyen d'un moteur synchrone accouplé, qui, de son côté, est relié par un amplificateur, à l'horloge en quartz de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt. On peut compter ainsi sur une constance de la fréquence moyenne de l'interrupteur d'environ $\pm 1 \cdot 10^{-8}$; c'est dire que cette fréquence peut être considérée comme exempte de toute erreur pour le but recherché.

ZICKNER.

APPAREIL
POUR
LA MESURE DES BOBINES
SERVANT A LA DÉTERMINATION
DE L'OHM INTERNATIONAL.

Le comparateur pour bobines de Kösters et Lampe est construit sur le principe général des comparateurs : le corps à mesurer se déplace, tandis que l'instrument de mesure reste au contraire en position invariable. La bobine S repose par sa face plane sur le plateau T du cylindre Z. Le cylindre est guidé en ligne droite

par le fourreau B; il peut être élevé ou abaissé par pression d'huile, pour obtenir le réglage en hauteur de la bobine S. La bobine S est ajustée sur le plateau T, de façon que son axe coïncide avec l'axe du cylindre-guide Z. Par élévation et rotation du cylindre et de la bobine autour de leur axe commun, le diamètre peut être mesuré en un point quelconque. Les mesures sont exécutées au moyen de deux têtes d'optimètre O_1 et O_2 , solidaires de l'enveloppe solide H, et dont la position peut être



ajustée de façon que la ligne joignant les deux contacts des optimètres coupe à angle droit l'axe commun de la bobine et du cylindre.

On utilise comme étalon un disque cylindrique déterminé par les interférences. De cette façon les diamètres des bobines, revêtues ou non de leur enroulement, sont déterminés au moyen des disques étalons correspondants.

La position de chaque spire de la bobine est mesurée au microscope; la bobine est alors éclairée de façon que la spire se détache nettement sur un fond de couleur blanche. On compare

les positions individuelles des spires (par élévation ou abaissement de la bobine au moyen de la pression d'huile) avec la règle graduée M, en invar, qui se trouve au voisinage immédiat de la bobine et qui lui est fixée. La rotation de la bobine et du cylindre-guide autour de leur axe commun par rapport à la règle graduée, permet de faire la mesure sur une génératrice quelconque. La rectitude du guidage du cylindre est contrôlée par les interférences.

ANNEXE E 2.

Physikalisch-Technische Reichsanstalt.

RAPPORT SUR L'ÉTAT DES TRAVAUX
CONCERNANT
LA DÉTERMINATION DE L'AMPÈRE ABSOLU.

En raison de la décision prise à la première session du Comité consultatif d'Électricité, en novembre 1928, d'après laquelle le remplacement des unités électriques internationales par les unités absolues était recommandé, la Physikalisch-Technische Reichsanstalt se trouvant dans la nécessité d'entreprendre une détermination de l'ampère absolu, se décida pour la balance de Rayleigh. Celle-ci en effet présente des avantages notables sur les autres méthodes; et l'on disposait d'une nouvelle publication du Bureau of Standards ⁽¹⁾ (1912), dans laquelle étaient rapportées des mesures absolues très précises de courant au moyen de cet appareil.

Pour la construction de l'appareillage, nous avons tenu compte des expériences décrites dans le précédent travail du Bureau of Standards; mais nous avons également utilisé, dès le projet de construction, des perfectionnements qui se sont avérés très bons jusqu'ici.

Comme, d'une part, l'appareil servant à la détermination magnétique du rapport des rayons des bobines (pour laquelle on a prévu trois translations et deux rotations assurant le réglage de la bobine mobile, ainsi qu'un réglage du système magnétique) fut achevé seulement au printemps 1933, et comme la balance elle-même ne fut prête d'autre part qu'au printemps 1934, on ne put

⁽¹⁾ *Bull. of the Bur. of St.*, vol. 8, n° 2, 1912, p. 270-393.

entreprendre la mesure du rapport des rayons que dans l'été 1933, et les pesées que dans l'été 1934.

En redéterminant le rapport des rayons, on a trouvé une concordance intérieure des mesures de quelques millionièmes. Il faut toutefois remarquer qu'à cette valeur doit être appliquée une correction, pour tenir compte de l'espace enroulé des bobines, correction dont la grandeur n'est pas déterminable avec une précision suffisante d'après les dimensions, en raison du mode de construction des bobines; c'est pourquoi on ne peut encore présenter aucune valeur provisoire pour le rapport de l'ampère absolu à l'ampère international. Actuellement, sur une deuxième série de bobines, on substitue au fil utilisé pour l'enroulement des bobines un conducteur en forme de bande; il est ainsi possible de déterminer plus exactement l'espace du bobinage. Pour éprouver l'invariabilité dans le temps des dimensions des bobines, les mesures du rapport des rayons de la première série de bobines sont actuellement répétées.

On a également introduit, en construisant la balance, de nombreux perfectionnements, et en particulier un système permettant de régler les bobines aussi exactement que possible. Les pesées entreprises avec cette balance pour quatre intensités de courant différentes coïncident entre elles de façon satisfaisante.

Pour le calcul numérique des expériences, on a utilisé tout d'abord les procédés fournis par Rosa, Dorsey et Miller ⁽¹⁾, et plus tard ceux développés par Snow ⁽²⁾.

⁽¹⁾ *Loc. cit.*

⁽²⁾ *B. S. Journ. Res.*, 11, 1933, p. 681.

ANNEXE E 3.

National Bureau of Standards.

RÉSUMÉ DU RAPPORT (1)

« UNE DÉTERMINATION ABSOLUE DE L'OHM »

Par MM. HARVEY L. CURTIS, CHARLES MOON
et M^{me} C. MATILDA SPARKS.

I. — INTRODUCTION.

Une détermination absolue de l'ohm, basée sur les unités de temps et d'inductance, a été exécutée au National Bureau of Standards. L'unité de temps, la seconde solaire moyenne, était fournie par les signaux horaires émis chaque jour par l'Observatoire naval des États-Unis. L'unité d'inductance, le henry absolu, était fournie par l'inductance d'une hélice en fil, la valeur de cette inductance étant déduite des dimensions géométriques de l'hélice. Ci-dessous sont donnés les caractéristiques et les résultats pour les trois hélices.

II. — CONSTRUCTION DES INDUCTEURS.

Chaque inducteur était constitué par une hélice de fil enroulé sur un noyau cylindrique. On a construit trois inducteurs, désignés, suivant la matière du noyau sur lequel ils sont enroulés, par les expressions : inducteur de porcelaine, inducteur de pyrex et inducteur de quartz. Les dimensions approximatives des noyaux cylindriques étaient :

Matière du noyau.	Longueur.	Diamètre.	Épaisseur des parois.
	cm	cm	cm
Porcelaine	45	29	2,5
Pyrex	30	46	7,5
Quartz	110	28	2,5

(1) Le rapport détaillé sera publié dans quelques mois.

Le noyau de porcelaine, exécuté par meulage sur un tour, au moyen d'une meule placée sur porte-outils, présentait des variations de diamètre de 20 microns. Les noyaux de pyrex et de quartz, préparés par une méthode de rodage, semblable aux méthodes utilisées par les opticiens, présentaient, après enroulement, des variations de diamètre de 5 microns environ.

Les trois inducteurs étaient bobinés avec du fil n° 21 (diamètre, 0^{mm},71) obtenu par l'étirage en six passes d'un fil de cuivre recuit n° 18 (diamètre, 1^{mm},02) sans aucun recuit entre les passes successives. L'étirage final et l'enroulement étaient faits simultanément. La filière de saphir était fixée sur le porte-outils du chariot du tour, et le fil était amené en place par la vis-mère du tour. La tension du fil était la tension nécessaire pour le faire passer à travers la filière (environ 3^{kg}).

Un fil étiré à travers une filière, parallèlement à l'axe de la filière, sera approximativement droit, et lorsqu'il sera enroulé sur un cylindre lisse, il se déplacera en roulant de la position dans laquelle on le dispose. Par étirage sous un petit angle avec l'axe de la filière, le fil peut être incurvé de telle façon que lorsque la tension est relâchée, il ait approximativement la même courbure que le noyau; il n'a alors aucune tendance à se déplacer. Par ce procédé, la forme ronde du fil n'est pas modifiée d'une façon mesurable. Pour favoriser le maintien de la position du fil, une mince couche de gomme laque était appliquée à la partie intérieure du fil, après que celui-ci avait quitté la filière, au moyen d'un rouleau en caoutchouc durci, qui s'appuyait légèrement contre le fil et qui trempait dans un récipient de vernis. La tension du fil était suffisante pour l'amener en contact intime avec le noyau cylindrique.

III. — MÉTHODES DE MESURE DES DIMENSIONS.

Les dimensions géométriques qui sont utilisées dans le calcul de l'inductance d'une hélice ayant un nombre entier de tours sont : le pas de l'hélice, son diamètre moyen et le diamètre du fil qui la constitue.

1. *Détermination du pas par des mesures de la distance entre les tours.* — Le pas était déterminé en mesurant la distance entre deux tours, l'un de ces tours se trouvant près de l'une des extrémités, l'autre tour près de l'extrémité opposée, et en divisant la distance mesurée par le nombre de tours. La dis-

tance entre les deux tours était obtenue par comparaison avec une échelle-étalon graduée en millimètres, la comparaison étant

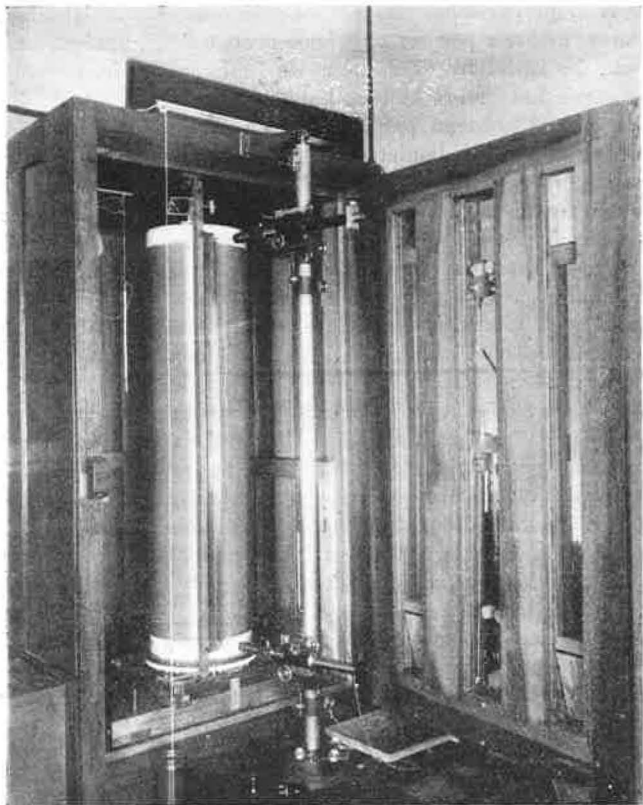


Fig. 1. — Cathétomètre pour les mesures de l'inducteur de quartz.

faite au moyen d'un cathétomètre spécial (1). La figure 1 représente la photographie du cathétomètre placé dans la position pour la mesure de l'inducteur de quartz. Ce cathétomètre portait

(1) Pour une description complète, voir Moon, *J. Research N. B. S.*, vol. 14, 1935, p. 363.

deux microscopes ayant chacun un oculaire micrométrique à fils. Le grossissement des microscopes était tel qu'une division sur le tambour micrométrique correspondait à environ 3 microns. Dans l'usage de cet instrument, les deux observateurs visaient simultanément avec les microscopes les fils choisis, et lisaient les

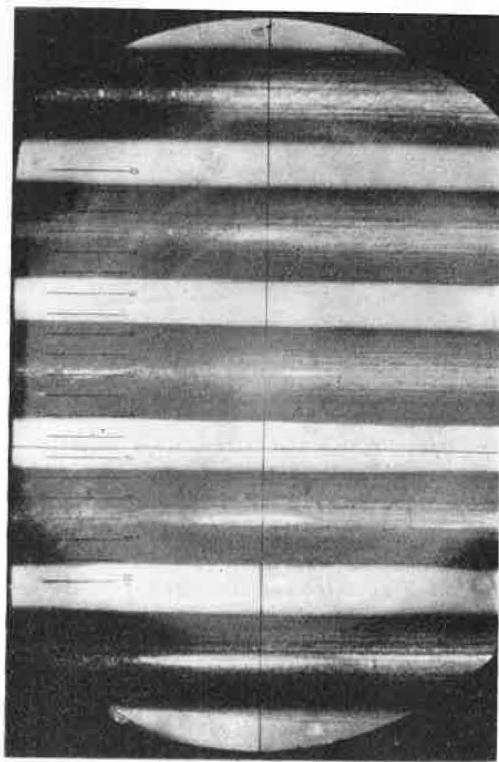


Fig. 2. — Aspect des « plages » sur les fils, au microscope du cathétomètre.

micromètres de chaque oculaire. Le cathétomètre était ensuite tourné de façon que les microscopes soient pointés sur l'échelle, et l'on faisait les lectures de chacun des micromètres sur deux des divisions millimétriques de l'échelle.

Dans la mesure des inducteurs de quartz et de pyrex, les microscopes pointaient des petites plages polies sur les fils. Ces plages étaient obtenues en appliquant contre les tours de l'hélice une pierre à huile plane à grains très fins, et en la faisant glisser parallèlement à l'axe de l'inducteur. La figure 2 est une reproduction de la microphotographie montrant l'aspect de ces plages dans le champ de l'oculaire micrométrique. Cette méthode n'était pas employée pour l'inducteur de porcelaine; car son diamètre n'était pas suffisamment uniforme pour obtenir des surfaces polies sur tous ses fils. Dans la mesure du pas de cet inducteur, le fil du microscope était placé de façon à bissecter l'espace entre deux tours de fil.

Deux méthodes étaient employées pour la détermination de l'inductance à partir de la distance entre les tours. Dans la première, le pas moyen de l'hélice était obtenu par la mesure, effectuée dans plusieurs plans axiaux équidistants, de la distance entre un certain nombre de paires de tours. Dans la seconde, le pas était obtenu à partir de la distance entre les deux tours terminaux, et une correction était appliquée aux autres tours de l'hélice pour les écarts qu'ils présentaient par rapport à l'hélice vraie.

2. *Diamètre moyen d'une hélice.* — Le diamètre moyen d'une hélice était obtenu en soustrayant le diamètre du fil du diamètre extérieur. On déterminait le diamètre extérieur en le comparant avec des étalons à bouts sphériques au moyen d'un micromètre automatique ⁽¹⁾. Les micromètres étaient gradués de façon à pouvoir faire les lectures directement en microns. Les divisions étaient à l'écartement d'environ 1^{mm} , de sorte qu'on pouvait estimer $0,1$. Les mesures étaient faites dans une chambre à température constante. Dans des conditions favorables, les lectures faites successivement, soit sur les étalons à bouts, soit sur l'inducteur, ne différaient pas de plus de $0,1$. La figure 3 représente une photographie du micromètre, disposé pour la mesure du diamètre de l'inducteur de porcelaine. Chaque fois qu'on élevait le micromètre, les longueurs des tiges de suspension étaient ajustées de façon que la lecture du micromètre fût minimum.

⁽¹⁾ Pour une plus complète description du micromètre et de la méthode d'étalonnage des étalons à bouts, voir Moon, *B. S. J. Research*, vol. 10, 1933, p. 249.

3. *Diamètre du fil.* — Le diamètre du fil a été déterminé par trois méthodes : *a*, au moyen d'un compas d'épaisseur micrométrique; *b*, en déterminant les densité, masse et longueur d'un

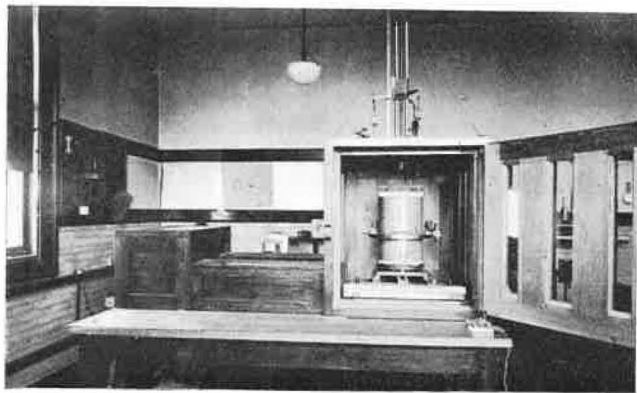


Fig. 3. — Compas d'épaisseur pour la mesure du diamètre (ind. porcelaine).

échantillon; *c*, en mesurant le diamètre du noyau à l'extrémité de l'hélice et le diamètre extérieur (comprenant le fil) aussi près que possible de cette extrémité. En aucun cas, les résultats des trois méthodes ne différaient entre eux de plus de $1,5$.

IV. — CALCUL D'UNE INDUCTANCE EN UNITÉS ABSOLUES.

L'inductance de chaque hélice était calculée par la formule de Snow ⁽¹⁾. Cette formule suppose que l'enroulement est une hélice parfaite et que le nombre des tours est entier. Elle contient un terme qui dépend de la distribution du courant dans la section droite du fil. Si la densité du courant est uniforme sur toute la section, le terme est négatif; mais si la densité du courant varie conformément à ce qu'on appelle la distribution naturelle, le terme est positif. Puisqu'il n'y a aucune méthode expérimentale pour déterminer la distribution du courant, ce terme introduit une incertitude dans le calcul de l'inductance. Cependant la valeur maximum de ce terme, dans le cas de l'un quelconque des trois inducteurs, était de $1,5$ millionième.

⁽¹⁾ *B. S. J. Research*, vol. 9, 1932, p. 419.

La perméabilité du noyau introduit une correction dans l'inductance calculée. Deux formules différentes ont été développées pour déterminer cette correction qui, calculée par les deux formules, est la même pour chaque inducteur. La susceptibilité volumique des supports et les corrections calculées sont données ci-dessous :

Inducteur.	Susceptibilité volumique du support.	Correction en millièmes
Porcelaine	$+ 1,24 \times 10^{-6}$	+ 4
Pyrex.....	- 0,86	- 4
Quartz.....	- 0,76	- 3

V. — MESURE D'UNE INDUCTANCE EN HENRYS INTERNATIONAUX N. B. S.

Le dispositif expérimental pour mesurer l'inductance en henrys internationaux N. B. S. exigeait une capacité intermédiaire qui était utilisée successivement dans deux ponts différents. Le pre-

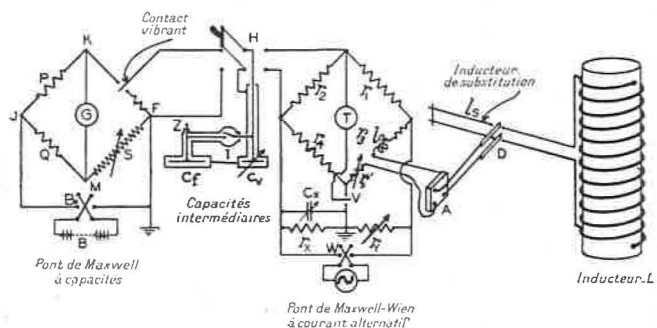


Fig. 4. — Disposition des ponts pour les mesures d'inductance.

mier pont était l'adaptation au courant alternatif par Wien du pont de Maxwell, en vue de la mesure d'inductances en fonction d'une capacité et d'une résistance; le second était un pont de Maxwell à capacités, au moyen duquel la même capacité était mesurée en fonction de la résistance et du temps. La figure 4 montre ces deux ponts, avec les condensateurs intermédiaires, placés de façon qu'on puisse les connecter avec l'un ou l'autre des ponts.

Pour faire une détermination, le procédé suivant était employé. L'inverseur H était fermé à droite de façon à connecter les condensateurs intermédiaires avec le pont *c.a.* Le commutateur D étant fermé à gauche de façon à connecter l'inducteur de substitution L_s avec le pont, et l'interrupteur cuirassé I étant ouvert, un observateur effectuait un groupe de quatre recherches d'équilibre sur le pont *c.a.*, correspondant aux quatre combinaisons possibles des positions des inverseurs A et W. Immédiatement après, un autre observateur effectuait un double groupe de recherches d'équilibre. Chaque équilibre était obtenu par réglage de la résistance r₃ et de la capacité C₀ du pont, et alternativement de la résistance r₂ et de la capacité C₁ de la terre de Wagner. La moyenne des huit lectures du condensateur C₀ était prise comme valeur de la capacité nécessaire pour équilibrer le pont quand l'inducteur de substitution était connecté. L'inducteur de substitution était alors remplacé par l'hélice L, en fermant D à droite, et le condensateur C_F était connecté par la fermeture de l'interrupteur I. La capacité de C_F et la résistance de l'inducteur de substitution étaient choisies de façon que de petites variations seulement sur C₀ et r₃ étaient nécessaires pour rééquilibrer le pont. Huit équilibres du pont étaient obtenus d'une manière semblable à ceux réalisés avec l'inducteur de substitution. Après l'achèvement des observations avec le pont *c.a.*, les capacités étaient immédiatement mesurées dans un pont de Maxwell par un observateur, et les résistances dans un pont de Wheatstone par un autre observateur. Quelques-unes des principales caractéristiques de chacun de ces ponts vont être signalées.

1. Le pont à courant alternatif de Maxwell-Wien. — Le pont à courant alternatif de Maxwell-Wien était utilisé avec la terre de Wagner, ainsi qu'il est représenté dans la partie droite de la figure 4. Une condition importante que ce pont doit remplir est que les résistances aient la même valeur en courant alternatif et en courant continu, puisqu'elles sont utilisées en courant alternatif, mais comparées avec les étalons en courant continu. Pour cette recherche, on a construit des rhéostats spéciaux constitués par du fil nu de manganine, logé dans une rainure hélicoïdale creusée sur un tube de verre pyrex. Les rhéostats étaient dépourvus d'inductance; car ils présentaient des sections de rainure hélicoïdale tournant alternativement à droite et à gauche. L'inductance calculée de l'une de ces bobines était

de 60 microhenrys. Les bobines avaient un très petit coefficient thermique de résistance et étaient complètement immergées dans une huile bien agitée pour maintenir une température uniforme.

L'équilibre des résistances du pont *c. a.* était obtenu en faisant varier la résistance r_3 , qui était constituée par un rhéostat spécial à mercure. La variation maximum de l'inductance de ces rhéostats était plus petite que 1 milliardième de l'inductance de l'une quelconque des hélices mesurées.

Le condensateur intermédiaire se composait d'une partie fixe C_f et d'une partie variable C_v .

Le condensateur fixe se composait de 22 sections, 20 ayant une valeur nominale de 0,01, et deux de 0,03 microfarad chacune. Chaque section pouvait être séparée du groupe, de sorte qu'on pouvait obtenir toutes les capacités de 0,01 microfarad à 0,26 microfarad. Chaque division du condensateur variable C_v représentait une capacité d'environ 0,6 micromicrofarad, et le dixième de la division pouvait être évalué aussitôt.

L'inducteur auxiliaire l_a était intercalé dans le bras à inductance du pont *c. a.* afin d'être assuré que le pont pouvait être équilibré pendant la mesure de l'inducteur de substitution l_s . L'inducteur de substitution l_s se composait de deux fils parallèles distants de 1^{cm} avec un collier réglable portant un petit fil susceptible d'établir un court-circuit en tout point voulu. La position du court-circuit était réglée de façon que l'inducteur de substitution présentât une résistance différant de celle de l'inducteur de moins de 0,05 ohm.

L'instrument de détection utilisé dans le pont *c. a.* était un galvanomètre à oscillations accordé à la fréquence du courant alternatif fourni. Dans quelques expériences le galvanomètre était connecté directement avec le pont, ainsi que le montre la figure 4. Dans d'autres cas, un amplificateur était intercalé entre le pont et le galvanomètre. Dans d'autres cas encore, un filtre à ondes et un amplificateur étaient intercalés entre le pont et le galvanomètre. Les résultats obtenus étaient les mêmes avec toutes ces connexions.

La fréquence de la force électromotrice appliquée était si basse (jamais supérieure à 100 cycles par seconde) que la simple équation suivante était suffisante :

$$L - l_s = (C - c)r_1 r_3,$$

où L est l'inductance de l'hélice et de ses conducteurs, l_s l'induc-

tance de l'inducteur de substitution, C la capacité pendant la mesure de l'inducteur, c la capacité pendant la mesure de l'inducteur de substitution, r_1 et r_3 les résistances situées dans les bras du pont.

2. *Le pont de Maxwell à capacités.* — Le pont de Maxwell à capacités a été récemment décrit (1); mais depuis lors une

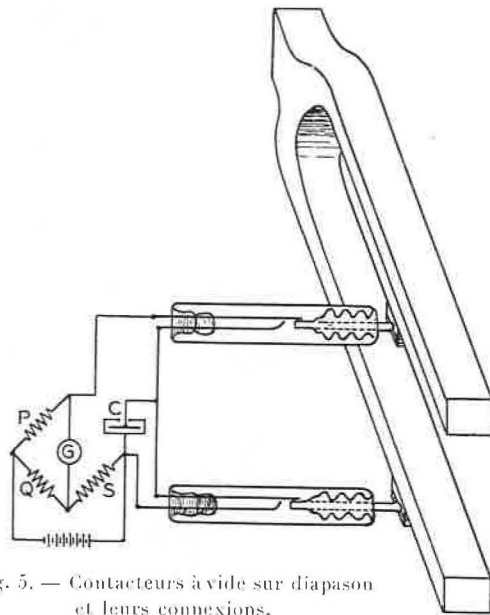


Fig. 5. — Contacteurs à vide sur diapason et leurs connexions.

modification lui a été apportée. On a construit deux nouveaux types de contacteurs pour charger et décharger les capacités; ces contacteurs améliorèrent à tel point la stabilité de la déviation du galvanomètre que les résultats pouvaient se reproduire approximativement à 1 milliardième près. Le premier des contacteurs, qui fonctionnait dans le vide, est visible sur la figure 5; le

(1) CURVIS et MOON, *Absolute Measurement of capacitance by Maxwell's method* (B. S. Sci. Pap., 22, n° 487, 1927, p. 564); voir aussi YONEDA et YAMAGUCHI, *Absolute Measurement of capacity by Maxwell's bridge method* (Researches of Electrotechnical Laboratory, Tokyo, n° 355, 1933).

second était un contacteur du type à inertie; il est visible sur la figure 6. Chaque type de contacteur était lié à un diapason qui était actionné en synchronisme avec le générateur étalon de fréquence de ce Bureau. Ce générateur était réglé journalièrement au moyen des signaux horaires de l'Observatoire naval des États-Unis, et il n'était jamais erroné de plus de 1 dix-millionième.

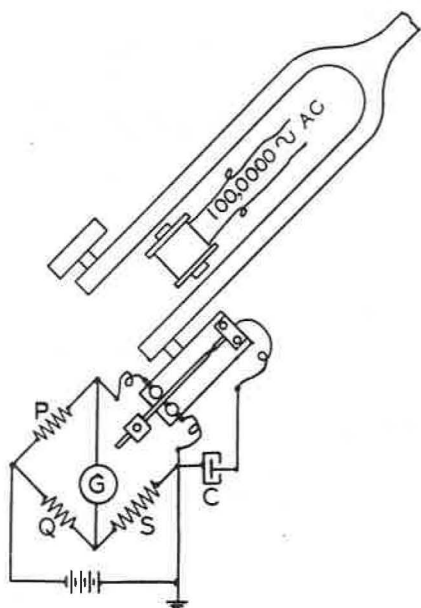


Fig. 6. — Contacteur à inertie et ses connexions.

Les capacités mesurées par le pont de Maxwell étaient légèrement différentes de celles qui étaient utilisées dans le pont *c.a.*; car les capacités des conducteurs étaient différentes dans les deux ponts. Cependant la différence de capacité ($C - c$ de l'équation utilisée pour le calcul de l'inductance) était la même pour les deux ponts, puisque le procédé employé éliminait la capacité des conducteurs dans chacun des ponts.

3. *Comparaison des résistances.* — Toutes les résistances ont été mesurées en fonction de l'ohm international, tel qu'il est conservé au National Bureau of Standards. Cette unité fut établie

par un comité technique du Comité international des Unités et Étalons électriques qui se réunit au National Bureau of Standards en 1910. Depuis lors, cette unité a été conservée ⁽¹⁾ dans ce Bureau au moyen d'un groupe d'étalons de 1 ohm. Les valeurs d'un certain nombre de bobines de 10, 100 et 1000 ohms ont été déterminées au moyen du groupe des bobines de 1 ohm, aux intervalles de quelques semaines. Ces bobines de valeur élevée ont été utilisées comme étalons, auxquels on a comparé tous les jours les rhéostats d'usage du pont *c.a.* et du pont de Maxwell.

VI. — OBSERVATIONS ET RÉSULTATS.

Durant les dix dernières années une grande quantité de résultats a été accumulée. Pendant ce temps la précision des mesures a été très fortement augmentée. Tous les résultats ont été soigneusement analysés et l'on a rejeté uniquement ceux où l'on a découvert une raison bien définie de le faire. Par exemple, dans quelques mesures, on a utilisé dans le pont *c.a.* des résistances qui ont montré plus tard des valeurs différentes en courant alternatif et en courant continu. Dans un grand nombre de mesures, deux ponts de Maxwell indépendants étaient utilisés pour la mesure des capacités. Les résultats d'un certain nombre de mesures sont donnés dans le Tableau I. La différence moyenne, abstraction faite du signe, est plus petite pour la capacité de 0,25 microfarad que pour celle de 0,1 microfarad. Cela s'explique par une sensibilité plus grande dans la mesure des capacités plus élevées.

Pour la mesure de l'inductance, aucune salle n'était parfaitement appropriée, aucune n'étant entièrement dépourvue de matériaux magnétiques. Un grand nombre de mesures ont été faites dans une salle qui avait dans le plancher et dans le plafond les barres de renforcement ordinaires en acier. Des épreuves préliminaires, faites avec de grandes masses de fer, conduisirent à la conclusion que près du centre de la salle, ces barres de renforcement ne devaient pas perturber l'inductance d'une quantité mesurable. Cependant, lorsque la sensibilité du pont *c.a.* fut plus tard fortement augmentée, les résultats obtenus à des hauteurs différentes montrèrent que, même au centre de la salle, les barres de renforcement affectaient l'inductance de

(1) Pour la description de la méthode, voir CURTIS, *Bulletin of National Research Council*, n° 93, 1933, p. 80.

TABLEAU I. — Différences des valeurs observées de la capacité lorsqu'un condensateur était mesuré au moyen des deux ponts de Maxwell différents. Résultats obtenus pendant les mesures de l'inducteur de pyrex.

0,1 microfarad		0,25 microfarad	
Date (1934)	Valeur fournie par le pont avec des contacts à inertie, moins valeur avec contacts à vide (en millièmes)	Date (1934)	Valeur fournie par le pont avec des contacts à inertie, moins valeur avec contacts à vide (en millièmes)
5 novembre.....	+7	15 novembre.....	+6
6 ".....	-2	16 ".....	0
7 ".....	+6	20 ".....	-2
8 ".....	+3	24 ".....	-5
14 décembre.....	-7	26 ".....	-2
		3 décembre.....	-2
		5 ".....	-4
		6 ".....	-3
		7 ".....	0
		12 ".....	+1
Moyenne.....	-1,0	Moyenne.....	-1,0
Moyenne, abstraction faite du signe.....	5,0	Moyenne, abstraction faite du signe.....	2,5

TABLEAU II. — Dimensions des trois inducteurs et leurs inductances calculées.

	Unité	Inducteur de porcelaine	Inducteur de pyrex	Inducteur de quartz
Diamètre moyen de l'hélice.....	centimètres	29,01850	46,24342	28,03808
Diamètre du fil.....	millimètres	0,7991	0,7974	0,7990
Pas de l'enroulement.....	id.	1,066750	1,066015	1,066031
Nombre de tours.....	-	383	263	1000
Longueur effective de l'hélice.....	centimètres	40,85652	26,30039	109,0031
Inductance calculée de l'hélice.....	millihenrys absolus	22,58904	30,86154	69,01225
Inductance calculée des conducteurs.....	id.	0,00078	0,00060	0,00125
Inductance calculée de l'inducteur de substitution.....	id.	0,00039	0,00043	0,00091
Correction pour la perméabilité du noyau.....	millièmes	+4	-4	-3
Correction pour la variation du pas.....	id.	-	+31	-0,5

TABLEAU III. — Rapport entre l'ohm absolu et l'ohm international du N. B. S.

(1)	(2)	Inductance mesurée			(6)	(7)	(8)	(9)	Écart par rapport à la moyenne pondérée
		(3)	(4)	(5)					
Porcelaine..	23,58052	1929-30	110	22,5788	13	1,0006170	1	+25	
	Pyrex.....	30,86179	1933-34 1934	45 20	30,87822 30,86807 Moy. 30,87814	3,0 2,8	1,0005442	3	- 8
Quartz.....		69,01236	1932 1934 1935	55 9 20	68,98133 68,98142 68,98133 Moy. 68,98136	3,9 3,6 4,8	1,0005490	4	- 1
						Moy. arithmétique 1,0005450			
						Moyenne pondérée 1,0005450			

quelques millièmes. On a fait alors des mesures avec l'inducteur placé à des hauteurs différentes dans une salle qui contenait dans son plancher des barres de renforcement en alliage d'acier non magnétique, et dans son plafond des barres de renforcement en acier ordinaire. De ces mesures une correction fut déduite, qui put être appliquée aux résultats obtenus dans la première salle. Les mesures finales avec l'inducteur de quartz étaient faites dans une salle où aucune correction, provenant des barres de renforcement, n'était nécessaire.

Dans le cas des inducteurs en pyrex et en quartz, une correction calculée pour la variation du pas a été appliquée à l'inductance. Cette correction était relativement petite dans les deux cas; mais il y a possibilité qu'une erreur subsiste encore. L'opinion des auteurs est que l'incertitude de cette correction est la plus grande source d'erreurs dans leur résultat final.

Dans ce résumé il n'est pas possible de discuter, en détail et individuellement pour chacun des inducteurs, les mesures et les résultats. Les dimensions géométriques principales et les inductances calculées sont indiquées dans le Tableau II. Les inductances calculées et mesurées sont données dans le Tableau III, qui fournit aussi la valeur du rapport de l'ohm absolu à l'ohm international NBS et l'écart par rapport à la moyenne. Les poids indiqués dans la colonne (9) sont approximativement en raison inverse de l'écart par rapport à la moyenne arithmétique simple.

Le résultat de ce travail peut être exprimé de la façon suivante :

$$1 \text{ ohm international NBS} = 1,000450 \text{ ohm absolu.}$$

Ce résultat peut être comparé directement avec les résultats obtenus au National Physical Laboratory et à l'Electrotechnical Laboratory de Tokyo; car les mesures faites au Bureau international des Poids et Mesures indiquent que la différence maximum dans les ohms internationaux, tels que les conservent les trois laboratoires, est seulement de 3 millièmes.

Les résultats obtenus dans ces laboratoires sont :

$$1 \text{ ohm international N. P. L. } (1) = 1,00048 \text{ ohm absolu.}$$

$$1 \text{ ohm international E. T. L. } (2) = 1,00046 \text{ ohm absolu.}$$

17 août 1935.

(1) Annual Report of the N. P. L., 1934, p. 57.

(2) Comité international des Poids et Mesures (Procès-Verbaux, 16, 1933, p. 28).

ANNEXE E 4.

National Bureau of Standards.

DÉTERMINATION ABSOLUE DE L'AMPÈRE.

RÉSUMÉ ÉTABLI POUR LES PROCÈS-VERBAUX DES SÉANCES DU COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, D'APRÈS LE MÉMOIRE PUBLIÉ DANS LE JOURNAL OF RESEARCH DU BUREAU OF STANDARDS, VOL. 12, 1934, p. 665.

PAR MM. HARVEY L. CURTIS ET ROGER W. CURTIS.

La balance de courant employée originairement par Rosa, Dorsey et Miller (1) a été quelque peu modifiée et utilisée pour déterminer la valeur absolue de l'ampère. Dans ce type de balance une petite bobine mobile est suspendue au fléau d'une balance, et disposée à mi-distance entre deux grandes bobines fixes. Chacune de ces bobines a une section méridienne carrée et un diamètre qui est grand comparativement à l'une quelconque des dimensions de sa section. La force électromagnétique agissant sur la petite bobine quand un courant passe à travers les trois bobines connectées en série est mesurée par la balance. Les bobines sont réglées de façon à être co-axiales et dans des plans horizontaux. L'écartement entre les bobines fixes est réglé de façon que la force entre les bobines soit un maximum. Quand les bobines sont dans cette position, le courant en unité absolue peut être calculé, à partir de la force, du rapport du rayon de la petite bobine à celui de chacune des grandes bobines, et du nombre de tours de chacune

(1) *A determination of the international ampere in absolute measure* (Bul. B. S., 8, 1911, p. 269).

des bobines. Les dimensions de la section des bobines servent à calculer quelques petits termes correctifs.

La force est mesurée en fonction de la masse d'un poids et de la valeur de l'accélération de la pesanteur. Le travail expérimental se divise naturellement en deux parties : la première partie est la mesure du rapport des rayons des bobines, l'autre est la mesure de la force entre les bobines, quand celles-ci sont parcourues par un courant constant.

A. RAPPORT DES RAYONS DES BOBINES.— Les dimensions principales des bobines, déterminées par Rosa, Dorsey et Miller à l'époque de leur enroulement, sont données au Tableau I.

TABLEAU I.

Dimensions principales des bobines.

Nature de la bobine.	Symbole.	Nombre de tours dans chaque enroulement.	Rayon approximatif moyen de la bobine.	Profondeur radiale de l'enroulement.	Largeur axiale de l'enroulement.
Mobile.....	M 2	72	12,499	0,955	0,956
"	M 3	98	10,030	1,029	0,997
Fixe.....	S 1	392	19,97	1,528	1,580
"	S 2	392	19,96	1,522	1,579
"	L 3	647	25,00	1,943	1,969
"	L 4	647	25,00	1,925	1,965

Pour mesurer le rapport entre les rayons d'une grande et d'une petite bobine, les bobines étaient montées concentriques et co-axiales, de façon que leur plan fût dans le plan vertical contenant le méridien magnétique. Un petit aimant était suspendu au centre commun des bobines. Les courants de sens opposé dans les deux bobines étaient réglés jusqu'à ce que le champ magnétique résultant au centre commun fût nul d'après l'indication du petit aimant placé au centre, qui devait alors avoir une déviation

nulle. Dans ce cas, le rapport des rayons $z = \frac{a_2}{a_1}$ est relié au courant I_1 et I_2 et au nombre de tours n_1 et n_2 par l'équation

$$(1) \quad z = \frac{a_2}{a_1} = \frac{n_2 I_2}{n_1 I_1}$$

Des petits termes correctifs sont nécessaires en raison de la section de dimension finie des bobines et de la longueur de dimension finie de l'aimant.

L'équation ci-dessus n'est exacte que dans le cas où les bobines sont exactement concentriques et co-axiales. Une méthode électrique était utilisée pour régler les bobines dans cette position. Une série de mesures du rapport des courants, pour la déviation nulle de l'aimant, fut faite avec une seule bobine dans différentes positions le long d'une même coordonnée, tandis que l'autre bobine et l'aimant demeuraient fixes. Quand les observations étaient reportées sur un graphique, elles donnaient une courbe qui avait un maximum ou un minimum. La position correcte de la bobine qui avait été déplacée était la position indiquée par ce maximum ou ce minimum. Les dix réglages nécessaires pouvaient être opérés indépendamment, d'après cette méthode. L'erreur sur le rapport des rayons après réglage a été estimée à une valeur inférieure à 2 millièmes.

Le circuit électrique utilisé pour obtenir le rapport des rayons est reproduit sur la figure 1. Le courant dans la petite bobine était réglé de façon que le renversement des deux courants ne modifie pas la position d'équilibre de l'aimant. Le rapport entre les deux courants était alors obtenu par l'inverse du rapport des deux résistances dans lesquelles on réalisait une chute de potentiel égale, ainsi qu'on s'en assurait par les indications nulles des deux galvanomètres. Un fil à contact glissant, mis en parallèle avec une petite fraction de l'une des résistances, fournissait l'appoint nécessaire pour amener à zéro les lectures des galvanomètres. Le rapport des courants pouvait alors être tiré du rapport des résistances et de la position du contact glissant. On a mesuré le rapport des rayons à plusieurs températures et on en a déduit le coefficient de dilatation des bobines. En utilisant plusieurs valeurs différentes du courant traversant les bobines, on a pu déterminer l'effet des variations de la charge électrique et évaluer un coefficient de charge. Des corrections furent éga-

lement faites pour tenir compte des conducteurs utilisés pour amener le courant aux bobines.

On a fait huit mesures distinctes du rapport des rayons, comprenant toutes les combinaisons possibles des deux petites

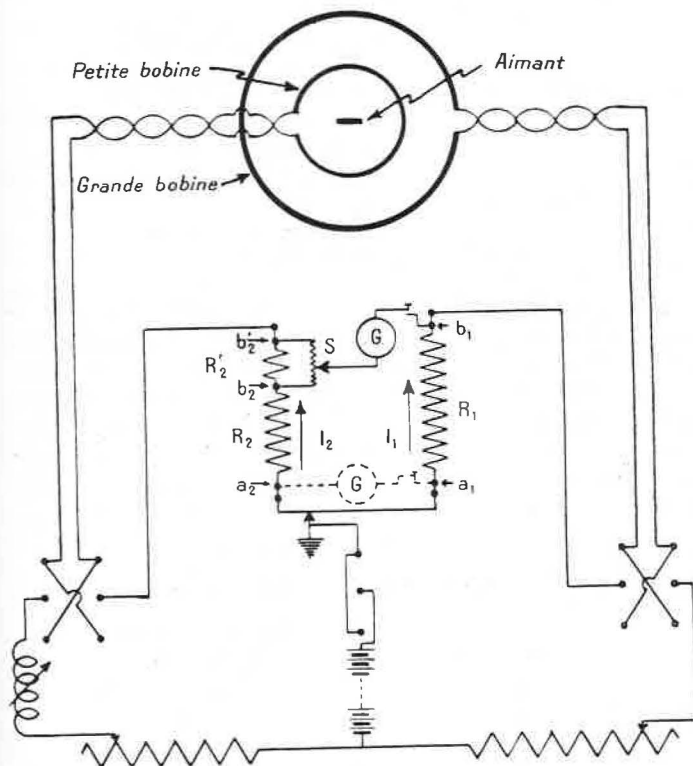


Fig. 1. — Circuits électriques utilisés pour mesurer le rapport des rayons des bobines.

bobines avec les quatre grandes bobines. Avec ces rapports, on a calculé quatre valeurs différentes du rapport des rayons des deux petites bobines, en utilisant chacune des grandes bobines comme bobine intermédiaire. Le Tableau II donne ces valeurs.

TABLEAU II.

Rapport calculé des rayons des deux bobines mobiles en utilisant chaque bobine fixe comme intermédiaire.

Bobine fixe intermédiaire.	Rapport des rayons M2/M3.	Écart par rapport à la moyenne (en million.).
S 1.....	1,246 107	— 3
S 2.....	1,246 113	+ 2
L 3.....	1,246 107	— 3
L 4.....	1,246 117	+ 5
Moyenne.....	1,246 111	± 3

L'écart maximum de ces quatre valeurs par rapport à leur moyenne est de 5 millièmes, ce qui fixe l'erreur maxima de ces mesures. En vue d'améliorer le résultat final, on a admis que la valeur moyenne du rapport des rayons des deux bobines mobiles était exacte, et on a corrigé les valeurs mesurées des autres rapports de façon à les rendre compatibles avec cette moyenne. Le Tableau III fournit le résultat des mesures du rapport des rayons.

TABLEAU III.

Résultats des mesures du rapport des rayons des bobines.

Bobines.	Rapport des rayons des bobines.
M 2 : L 3.....	0,500 1586
M 2 : L 4.....	0,500 0701
M 3 : L 3.....	0,401 3758
M 3 : L 4.....	0,401 3045
M 2 : S 1.....	0,625 8941
M 2 : S 2.....	0,626 1844
M 3 : S 1.....	0,502 2778
M 3 : S 2.....	0,502 5110

B. MESURE DE LA FORCE EXERCÉE ENTRE LES BOBINES. — La figure 2 représente la disposition de l'appareil mesurant la force exercée entre les bobines. Les grandes bobines fixes étaient

assujetties au-dessus de marbre d'une caisse, et la petite bobine était suspendue au plateau d'une balance de précision placée sur

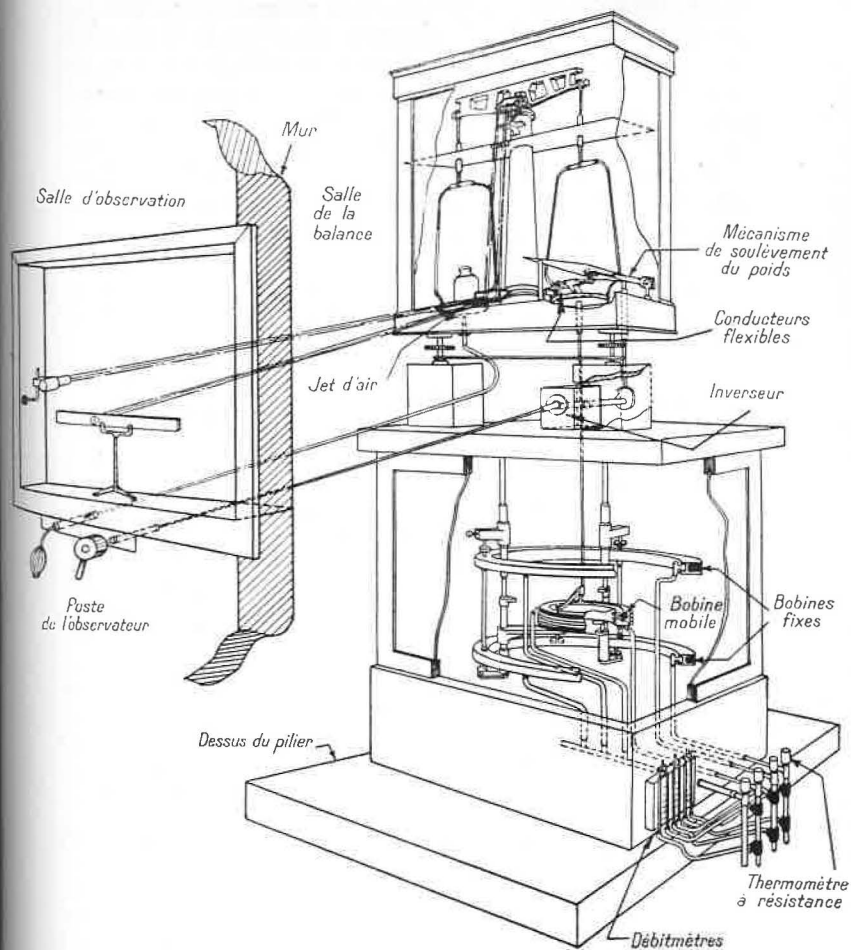


Fig. 2. — Ensemble de la balance de courant et du poste de l'opérateur.

le marbre. La petite bobine était suspendue au plateau de la balance par un tube de bronze contenant les conducteurs élec-

triques. Sur le plateau de la balance, des conducteurs flexibles transmettaient le courant entre le système mobile et le reste du circuit. Un poids pouvait être ajouté ou retranché sur le plateau par un mécanisme qui était manœuvré du poste de l'opérateur situé dans une salle contiguë. Dans cette salle la position du fléau de la balance était repérée sur une échelle par un système optique. Le mouvement du spot lumineux sur l'échelle était environ 72 fois celui de la bobine mobile. Le courant était contrôlé et inversé de cette salle, de sorte qu'il n'était pas nécessaire de pénétrer dans la salle de la balance pendant les opérations de pesage. Cette disposition permettait de faire une pesée avec une exactitude d'environ 0^{ms},01. Comme les forces à mesurer étaient d'environ 5 à 10 grammes-poids, une exactitude de 1 ou 2 millièmes était donc atteinte dans la mesure de la force.

Avant de faire une mesure de la force, un courant était maintenu dans l'enroulement pendant plusieurs heures. Cela permettait au courant de se stabiliser et aux bobines d'atteindre une température constante. Pendant ce temps les grandes bobines fixes étaient refroidies avec de l'eau circulant à travers un canal dans la bobine, de la même manière qu'au moment de la pesée. De même, le refroidissement de la bobine mobile était fait de façon semblable pendant cette période et pendant la pesée, de sorte que les courants de convection dans l'air environnant se stabilisaient et exerçaient une force constante vers le haut sur le système mobile.

Le courant étant constant et le poids étant enlevé du plateau de la balance, l'observateur réglait la tare sur le plateau opposé jusqu'à ce que la balance ait atteint une position d'équilibre convenable. Après avoir déterminé soigneusement cette position d'équilibre, on renversait le courant dans les grandes bobines fixes, et on ajoutait en même temps le poids, de sorte qu'il n'était pas nécessaire d'arrêter le fléau de la balance. La nouvelle position d'équilibre de la balance était alors déterminée. Le courant et le poids avaient des valeurs telles que la seconde position d'équilibre de la balance n'était que très légèrement différente de la première. Si les deux positions d'équilibre avaient été exactement les mêmes, la force électromagnétique sur la petite bobine aurait été exactement égale à la moitié de la force de la pesanteur agissant sur le poids. En réalité les deux positions d'équilibre étaient rarement les mêmes, de sorte qu'une petite correc-

tion était nécessaire, correction qu'on déduisait de la différence entre les positions d'équilibre et de la sensibilité de la balance. Pour éliminer l'effet d'une marche quelconque de la position d'équilibre de la balance sur la force mesurée, on faisait une série d'au moins six déterminations d'équilibre, avec le poids alternativement posé et enlevé.

Il était nécessaire de régler les bobines dans la balance de courant de façon que leurs plans fussent horizontaux, leurs axes coïncidant, et que l'espace compris entre elles fût tel que la force s'exerçant entre chaque bobine fixe et la bobine mobile fût un maximum. Les plans de ces bobines étaient réglés à l'horizontalité au moyen de niveaux sensibles. Tous les autres réglages étaient faits en déterminant les positions des bobines dans lesquelles la force, pour un courant constant, était maxima, minima, ou indépendante de la position. Pour certains de ces réglages, les courants à travers les bobines fixes étaient de sens tels que les forces s'exerçant entre chaque bobine fixe et la bobine mobile fussent de même direction. La force résultante était grande et était désignée par « somme des forces ». Pour d'autres réglages le courant à travers l'une des bobines fixes était renversé de façon que les forces fussent de direction opposée. La force résultante était petite et était désignée par « différence des forces ». Quand la différence des forces pour un courant constant était indépendante de petits déplacements verticaux de la bobine mobile, la disposition des bobines fixes était telle que la somme des forces fût maxima quand la bobine mobile était à mi-distance des bobines fixes. Deux séries semblables de mesures de la différence des forces, faites alors que la bobine mobile était soumise à des déplacements horizontaux, avaient pour but de vérifier que les deux bobines fixes étaient co-axiales.

La bobine mobile était réglée de façon à être co-axiale avec les bobines fixes, en mesurant la somme des forces correspondant à un courant constant, lorsque la bobine mobile avait différentes positions le long des deux axes perpendiculaires situés dans un plan horizontal. Les bobines étaient co-axiales dans la position donnant une force minima. On déterminait la position de la bobine mobile à mi-distance des bobines fixes, comme étant la position, le long d'un axe vertical, pour laquelle la somme des forces correspondant à un courant constant était maximum.

Après le réglage des bobines, on mesurait la force à différentes températures et pour des courants de différentes valeurs.

L'effet des conducteurs était déterminé expérimentalement. Une correction était appliquée pour la poussée de l'air sur le poids en platine. En utilisant le coefficient de température et le coefficient de charge des diverses bobines (déterminés au moment de la mesure du rapport des rayons), on réduisait les observations aux mêmes conditions normales que celles qu'on avait utilisées pour faire les mesures du rapport des rayons. On calculait la valeur absolue du courant par la force exercée et par le rapport des rayons.

En même temps qu'on faisait les pesées, on mesurait le courant en unités N. B. S. internationales, en comparant la différence de potentiel qui était produite entre les bornes d'une résistance étalon et la force électromotrice d'une pile étalon (voir *fig. 3*).

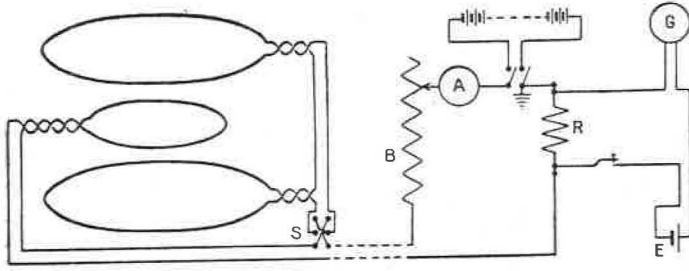


Fig. 3. — Circuits électriques de la balance de courant.

Un galvanomètre était intercalé en série avec une pile étalon, et leur ensemble était branché aux bornes d'une résistance étalon traversée par le courant à mesurer. Le courant était réglé jusqu'à ce que le galvanomètre ne dévie plus : le courant était alors donné en ampères internationaux N. B. S., comme le quotient de la force électromotrice par la résistance. Comme on mesurait ce même courant, par la balance de courant, en fonction de l'ampère absolu, le rapport de ces deux valeurs numériques était égal au rapport entre l'ampère international N. B. S. et l'ampère absolu. Ce rapport est utilisé pour exprimer les résultats obtenus dans ces recherches.

C. RÉSULTATS. — La valeur absolue du courant était obtenue en divisant la racine carrée de la force mesurée par une constante, calculée pour chaque combinaison de bobines. La force

TABLEAU IV.

Exemple d'observations et de résultats dans la détermination absolue de l'ampère.

Combinaisons des bobines L₃, L₄, M₂.

Date, 1931	Force observée (en grammes-poids), à charge nulle.	Force réduite à 22° C.	Valeurs du courant		Ecart par rapport à la moyenne de la série millièmes.
			I _A ampères absolus.	I _{NBS} ampères int. NBS.	
Fév. 17.....	4,68254	4,68273	0,678221	0,678294	+ 7
" 18.....	261	276	224	203	+ 2
" 21.....	262	280	227	204	- 1
" 25.....	262	280	227	204	- 1
Mars 17.....	256	277	224	204	+ 3
" 20.....	256	280	227	203	- 3
Avril 3.....	266	284	230	203	- 7
" 8.....	250	282	228	204	- 3
Moy. des 8 observations.....				100	± 3

Les résultats moyens correspondant à chaque combinaison de bobines sont donnés au Tableau V en même temps que les poids admis et le résultat final.

TABLEAU V.

Résultats moyens pour chaque combinaison de bobines.

1	2	3	4	5	6	7
Bobines fixes.	Bobine mobile.	Nombre d'observations indépendantes.	$\frac{I_{NBS}-I_A}{I_A}$	Rapport des valeurs d'un courant en ampères absolus et en amp. int. NBS.	Poids.	Écart par rapport à la moyenne
L 3 L 4.....	M 3	31	81×10^{-6}	0,999919	5	-9×10^{-6}
L 3 L 4.....	M 2	30	94 "	0,999906	5	-22 "
S 1 S 2.....	M 3	14	53 "	0,999947	5	+19 "
S 1 S 2.....	M 2	30	10 "	0,999990	1	+62 "
Moyennes pondérées.....				0,999928		$\pm 30 \times 10^{-6}$
Erreur probable de la moyenne pondérée.....						$\pm 8 \times 10^{-6}$

maxima entre deux fils circulaires transportant le courant unité est une fonction du rapport des rayons, et peut être calculée au moyen de la formule à intégrale elliptique de Maxwell. On peut trouver ces intégrales dans les tables de Legendre ou les calculer directement au moyen des séries arithmético-géométriques indiquées par King (1). La force maxima par unité de courant entre les bobines réelles était déterminée en calculant d'abord la force pour des fils situés en leur centres, en multipliant cette force par le nombre de tours, et en faisant une correction pour la dimension finie de la section méridienne des bobines. Cette correction est calculée au moyen de la formule de Snow (2). La force mesurée est le produit de la masse du poids par la valeur de l'accélération de la pesanteur dans la balance.

On a déduit le résultat final de 105 observations indépendantes du rapport de l'ampère absolu à l'ampère international. Quatre combinaisons de bobines furent utilisées pour faire ces observations. Le Tableau IV donne un exemple des observations et des résultats pour un groupe d'observations correspondant à une combinaison de bobines.

Le résultat final peut être exprimé par l'égalité :

$$1 \text{ ampère international NBS} = 0,999\ 928 \text{ ampère absolu.}$$

Les auteurs estiment que ces résultats diffèrent du résultat exact de moins de 20 millièmes. Ce résultat est en bonne concordance avec les résultats de la détermination faite en 1911 par Rosa, Dorsey et Miller, ce qui indiquerait que l'unité de courant, telle qu'elle est conservée au National Bureau of Standards, n'a pas substantiellement changé depuis cette époque.

24 septembre 1935.

(1) *On the direct numerical calculation of elliptic functions and integrals* (Cambridge University Press, 1924).

(2) *The attraction between coils in the Rayleigh current balance* (B. S. J. Research, 11, 1933, p. 681).

ANNEXE E 5.

Laboratoire central d'Électricité.

TRAVAUX PRÉLIMINAIRES

POUR

LA DÉTERMINATION DE LA VALEUR

DE

L'UNITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE C. G. S.
DE RÉSISTANCE

Par M. R. JOUAUST.

La méthode qu'on compte employer au Laboratoire central d'Électricité pour la détermination de la valeur de l'unité électromagnétique C. G. S. de résistance, est une modification de celle indiquée par A. Campbell. Elle a été imaginée par M. Marcel Picard, physicien au Laboratoire ⁽¹⁾.

Comme dans toutes les méthodes de ce genre, la détermination de l'unité électromagnétique de résistance dépend de la connaissance de la fréquence d'un courant et de celle de la valeur de diverses inductances mesurée en fonction d'une inductance étalon, dont la valeur a été elle-même déduite par le calcul de ses dimensions géométriques.

La première partie, actuellement en cours, du travail consistait donc dans la réalisation de cette inductance.

La forme choisie a été celle d'une bobine cylindrique à une seule couche d'environ 80^m de longueur et 10^m de diamètre.

(1) M. PICARD, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 189, 1929, p. 125.

Comme noyau, on utilise un cylindre de quartz soigneusement travaillé de façon à se rapprocher autant que possible du cylindre parfait.

Comme procédé pour la détermination du diamètre, on a choisi celui qui consiste à mesurer la longueur du fil enroulé, procédé déjà employé en 1907 au Laboratoire central d'Électricité pour la mesure des diamètres des bobines d'un électrodynamomètre absolu, et par Grüneisen et Giebe dans leur travail sur la détermination de l'ohm en valeur absolue.

Nous donnerons quelques détails sur le mode opératoire actuellement employé.

Le fil de cuivre servant au bobinage (fil émaillé de 0^{mm},45 bobiné au pas de 0^{mm},5) à sa sortie du rouleau magasin passe sur une poulie, puis descend dans un puits de 8^m de profondeur sous l'action d'un poids tenseur de 500 grammes, suspendu à une poulie mobile portée par le fil.

Le fil passe ensuite sur un autre système de poulies et vient finalement s'enrouler sur le noyau entraîné par un tour.

Avec ce dispositif, il est possible de mesurer la longueur du fil par fraction de 16^m.

Lorsqu'une longueur de 16^m (deux brins de 8^m) est descendue dans le puits, un opérateur placé au fond du puits relève, par rapport au micromètre oculaire d'un microscope un repère tracé sur la chape de la poulie portant le poids tenseur. Puis le tour est mis en marche, le fil s'enroule, sort du puits, et l'opération est arrêtée lorsque le repère tracé sur la chape arrive dans le champ d'un second microscope placé à l'extérieur du puits.

A ce moment, on relève par rapport au micromètre oculaire du second microscope la position du repère de la chape.

La longueur du fil enroulé se déduit de la distance des deux microscopes.

Il est possible de contrôler celle-ci en cours d'opération au moyen d'une règle verticale de 8^m de longueur placée dans le puits et constituée de cuivre comme le fil.

Au moyen d'un jeu de prismes, il est possible en effet de viser au moyen des microscopes deux repères tracés aux extrémités de cette règle. La distance entre ces repères, ainsi que le coefficient de dilatation linéaire de la substance constituant la barre, ont été déterminés au Bureau international des Poids et Mesures. Des résistances chauffantes et un système de ventilation permettent de maintenir constante, à 1 dixième de degré près, la tempéra-

ture du puits, température que des thermomètres de précision placés à diverses hauteurs permettent d'évaluer.

Une étude mathématique ⁽¹⁾ faite par M. Louis Roy, correspondant de l'Institut, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse, a permis de prédéterminer l'influence que pourraient avoir sur le mode opératoire employé les déformations provoquées sur la section droite du fil par son enroulement sur le cylindre. Elle a montré que cette influence était négligeable pour la précision envisagée.

On compte, le bobinage terminé, contrôler la mesure du diamètre de la bobine, effectuée comme il est dit plus haut, par des déterminations au palpeur du diamètre extérieur.

⁽¹⁾ Louis Roy, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 198, 1934, p. 1465.

ANNEXE E6.

National Physical Laboratory.

MESURE ABSOLUE DE LA RÉSISTANCE.

La présente Note donne un aperçu des résultats de la détermination de la résistance en valeur absolue, faite au National Physical Laboratory : a, au moyen de l'appareil de Lorenz; b, au moyen de la méthode du pont à courant alternatif de Campbell.

a. Appareil de Lorenz. — Pendant les trois dernières années, plus d'une centaine de déterminations de résistance en mesure absolue ont été exécutées avec l'appareil établi en 1912 par F. E. Smith ⁽¹⁾. Le résultat, exprimé en fonction de l'ohm international, tel qu'il est conservé au National Physical Laboratory au moyen de bobines de fil, peut être présenté de la façon suivante :

$$1 \text{ ohm international} = 1,00050 \pm 0,00002 \text{ ohm (c. g. s.)}$$

L'appareil de Lorenz est resté pratiquement inchangé depuis sa construction, et son fonctionnement a été trouvé satisfaisant. Les méthodes pour contrôler et mesurer la vitesse de la machine et pour apprécier l'équilibre électrique entre la différence de potentiel aux bornes de la résistance à mesurer et la force électromotrice engendrée dans les conducteurs tournants ont été les mêmes que celles utilisées auparavant; mais un appareil nouveau a été construit pour la mesure de la distance axiale entre les bobines, au moyen duquel — et ceci est de toute importance — cette mesure peut être effectuée plus rapidement et plus exactement qu'autrefois.

En relation avec les mesures électriques, les dimensions linéaires

⁽¹⁾ *Phil. Trans. Roy. Soc., A*, 214, 1914, p. 27.

des quatre bobines ont été remesurées et un nouveau calcul de la constante de l'instrument a été effectué. La nouvelle valeur diffère de celle de 1912 de 24 millièmes, ce qui constitue une altération relativement petite pour un intervalle de temps de plus de 20 années, et indique qu'au point de vue de la variation séculaire, les cylindres de marbre sur lesquels la bobine a été enroulée se sont comportés d'une façon satisfaisante. D'autres déterminations avec l'appareil de Lorenz vont encore être effectuées prochainement, en même temps que les déterminations par la méthode de Campbell.

b. Méthode du pont à courant alternatif de Campbell. — Dans le cours de l'année 1931, quarante-six déterminations de résistance en valeur absolue ont été exécutées au moyen de la méthode du pont à courant alternatif élaborée par Albert Campbell (1). L'étalon fondamental de référence, dans cette méthode, est l'étalon primaire d'induction mutuelle établi par Campbell (2).

Les déterminations furent exécutées en utilisant un courant alternatif de la fréquence de 50, 100 et 200 cycles par seconde. Cela conduit à déterminer en valeur absolue des résistances allant de 1 à 160 ohm.

En fonction de l'ohm international tel qu'il est conservé au N. P. L., au moyen de bobines de fil, les résultats peuvent être exprimés de la façon suivante :

$$1 \text{ ohm international} = 1,00047 \pm 0,00002 \text{ ohm (c. g. s.)}$$

La possibilité que des différences systématiques entre la méthode de Campbell et celle de Lorenz, pourraient être dues à ce que la première de ces méthodes utilise le courant continu, et la deuxième le courant alternatif, a été étudiée; et il a été démontré que les bobines de manganine, du type utilisé dans ces déterminations, ne présentent aucun changement de résistance avec la fréquence, dont ne puisse rendre compte la théorie classique.

Un pas de plus dans la corrélation des méthodes de Campbell et de Lorenz a été accompli en 1934, lorsqu'on a effectué une com-

(1) *Proc. Roy. Soc., A*, vol. 107, 1925, p. 310.

(2) *Proc. Roy. Soc., A*, vol. 79, 1907, p. 428.

paraison des étalons primaires d'inductance utilisés dans chacune des méthodes. Une série considérable de mesures a montré que les unités d'inductance représentées par ces étalons concordaient à un cent-millième.

Le pont de Campbell a maintenant été reconstruit et transformé en appareil permanent, et des perfectionnements techniques considérables lui ont été apportés, en particulier pour ce qui concerne la mesure de la fréquence et l'appréciation de l'équilibre. On peut prévoir que des déterminations avec le nouvel équipement seront bien au point vers la fin de cette année.

Juillet 1935.

MATÉRIAUX POUR LA CONSTRUCTION DES ÉTALONS DE RÉSISTANCE.

Les travaux concernant les matériaux pour l'exécution des résistances électriques au National Physical Laboratory ont été poursuivis dans deux directions différentes. L'une consistait dans la construction de résistances en platine, et l'autre dans le perfectionnement des résistances en manganine d'une stabilité éprouvée.

L'importance de la stabilité dans les mesures électriques fondamentales a rendu désirable la construction des résistances de la valeur de 1 ohm en platine. L'expérience des résistances construites pendant les 70 dernières années a montré que certaines résistances en platine ont été probablement plus stables que celles construites en tous autres matériaux. Les résistances de platine ont été construites dans le but de former des étalons de référence et faciliter ainsi le maintien de la constance de l'unité fondamentale de résistance. Une brève description de ces résistances est donnée plus loin.

L'emploi des étalons de résistance en métaux purs demande une grande précision dans la connaissance de leur température; et cela ne supprime pas la nécessité de se servir, dans l'usage général, des résistances à faibles coefficients thermiques. Un travail a été poursuivi au National Physical Laboratory, pendant plusieurs années, sur les conditions qui affectent la stabilité des résistances en manganine, et les résultats en sont brièvement décrits.

Résistances de platine. — Pendant la réunion de 1933 du Comité consultatif, on a signalé la proposition du National Physical Laboratory de construire des bobines en platine pur qui devaient éventuellement prouver leur haute valeur en tant qu'étalons de résistance.

Il n'était pas question de substituer les bobines de platine aux bobines en alliages divers, qui servent pour les mesures courantes de laboratoire et pour les comparaisons internationales des étalons de résistance; mais l'expérience antérieure conduisait à la conclusion que, sur un intervalle de temps de plusieurs décades, les étalons en platine seraient probablement plus stables que les étalons en alliage.

Six bobines de résistance de 1 ohm ont été établies en 1934; leur construction est telle qu'on peut s'attendre à ce qu'elles fournissent une stabilité de l'ordre le plus élevé. Trois bobines sont faites avec du fil de $0^{\text{mm}},4$, et trois autres avec du fil de $0^{\text{mm}},6$ de diamètre. Les enroulements eux-mêmes sont en platine aussi pur qu'il est possible de l'obtenir, et s'appuient sur des supports en silice fondue, semblables à ceux qu'on utilise au National Physical Laboratory pour les thermomètres à résistance. Les fils de connexion sont en platine pur du commerce, les raccordements de l'enroulement et des fils de connexion sont faits par fusion des fils entre eux. Cinq de ces bobines sont scellées dans des tubes de verre, auxquels les fils de connexion en platine peuvent être soudés. La dernière bobine est scellée dans un tube de silice fondue; les scellements dans ce cas sont effectués avec du plomb fondu à la façon employée pour la première fois dans le scellement des grandes valves thermoioniques. Chaque bobine repose sur un petit tampon de coton de silice placé dans le fond du tube. Après leur construction et ajustage, les bobines furent très bien nettoyées chimiquement, puis chauffées dans le vide de façon à recuire le fil et à en extraire tous gaz et vapeur absorbés. On a introduit ensuite dans le tube, à une pression un peu plus faible que la pression atmosphérique, soit un mélange d'argon et d'azote, soit de l'air sec. Les tubes furent finalement scellés.

Les étalons sont destinés à fonctionner uniquement au point de fusion de la glace; car une réobtention de leur valeur, à 4 millièmes près, nécessite la reproductibilité de la température à 1 millième de degré près.

De nombreuses années devront s'écouler avant que l'utilité de

ces étalons soit établie ou controversée; mais les résultats des comparaisons faites jusqu'à présent sont de bon augure.

Résistances de manganine. — Depuis plusieurs années on poursuit au National Physical Laboratory l'étude des facteurs qui ont une influence sur la stabilité de la valeur de la résistance d'un fil de manganine, quand on utilise celui-ci sous une forme appropriée aux étalons de référence des mesures électriques. Les travaux de Rosa et Babcock au Bureau of Standards, et ceux de F. E. Smith au National Physical Laboratory, ont montré tous deux que la variation de l'humidité atmosphérique peut affecter sérieusement la valeur des résistances en manganine qui sont protégées par une couche de vernis à la gomme laque. Cet effet est attribué à l'augmentation de volume du vernis quand celui-ci absorbe de l'humidité; il en résulte un allongement du fil et l'accroissement de sa résistance. Pour cette raison les résistances ont été fréquemment construites de manière que le fil soit immergé dans l'huile hermétiquement isolée de l'atmosphère.

L'expérience du National Physical Laboratory, pendant ces quelques dernières années, a montré que ce mode de construction n'empêche pas une variation lente de la résistance, lorsque la gomme laque est utilisée de la manière habituelle. Il a été trouvé qu'une résistance, bobinée sur un cylindre isolé, traitée avec la gomme laque et immergée dans l'huile, augmente de valeur avec une vitesse décroissante pendant plus de 1000 jours, la variation totale étant de l'ordre de 50 millièmes. Une étude systématique des effets produits par des modifications du traitement et du mode de construction, a montré la possibilité de faire des résistances qui sont constantes dès l'époque de leur construction, et dont la variation totale en 1000 jours ne dépasse probablement pas 1 ou 2 millièmes.

La méthode qui a été reconnue satisfaisante comporte les traitements suivants :

1^o Recuit à 550°, ainsi qu'il est indiqué par le Bureau of Standards. Ce recuit a été fait au National Physical Laboratory dans une atmosphère d'azote.

2^o Enroulement du fil sous sa forme finale avant recuit.

3^o Traitement par l'acide pour enlever la couche superficielle du fil après recuit.

4^o Montage du fil sur son support définitif, de façon qu'il ne subisse aucune contrainte.

5^o Suppression de l'usage de la gomme laque, sauf en une très mince couche de protection contre l'oxydation.

6^o Immersion dans l'huile de paraffine purifiée, à l'intérieur d'un récipient hermétiquement clos.

Plusieurs résistances de la valeur de 1 ohm ont été construites de cette façon; on n'a jamais relevé aucun indice d'une variation de leur valeur après construction, comme cela se produisait généralement lorsque la construction était faite d'après les méthodes plus courantes. Ces variations, qui étaient généralement assez rapides pendant les toutes premières semaines ou les premiers mois, ont souvent obligé les fabricants à garder les résistances pendant un an, ou plus, après leur construction, avant de faire l'ajustage ou la mesure finale.

Il est dans notre intention de publier prochainement une Note à ce sujet.

Juillet 1935.

ANNEXE E 7.

National Physical Laboratory.

MESURE ABSOLUE DU COURANT.

La présente Note donne un aperçu des résultats de la détermination du courant en valeur absolue, effectuée au National Physical Laboratory au moyen d'une balance de courant.

La balance de courant établie au National Physical Laboratory par Ayrton, Mather et Smith en 1905, fut utilisée dans le but de comparer l'ampère avec l'unité de courant réalisée au National Physical Laboratory au moyen de résistances étalons et d'éléments étalons.

L'instrument en question se compose d'une balance de physique dont le fléau a 50^{cm},8 de longueur, et de deux systèmes semblables de bobines disposés de part et d'autre du centre de la balance. Chaque système est constitué par deux bobines, la plus petite d'entre elles étant suspendue au couteau extrême du fléau et se trouvant à l'intérieur de la plus grande. La plus grande des bobines repose sur un plan, qui peut être nivelé ainsi que réglé en hauteur et en position horizontale. Les corps des quatre bobines sont constitués par des cylindres de marbre, sur lesquels le fil est enroulé en une seule couche et en deux hélices contiguës; le fil est logé dans des rainures creusées dans le marbre. Le diamètre des grandes bobines est de 32^{cm}, celui des petites 20^{cm}. Le bobinage de chaque grand cylindre est subdivisé en deux portions, de 11^{cm} de longueur chacune, séparées par un intervalle de 3^{cm}. Les petites bobines ont 15^{cm},2 de longueur. L'enroulement de toutes les bobines est effectué à raison de dix tours par centimètre de longueur. Dans la position correcte, les axes des deux bobines de chacun des systèmes sont verticaux, et coïncident; de même que coïncident aussi leurs plans diamétraux moyens.

Les connexions électriques entre les petites bobines et le reste du système sont effectuées par un certain nombre de fils d'argent fins, qui pratiquement n'exercent aucun effort sur le fléau de la balance, et qui, ainsi qu'on l'a reconnu expérimentalement, n'exercent aucune force électromagnétique sur les bobines. Toutes les autres connexions sont faites au moyen de câbles concentriques ou torsadés.

Dans le fonctionnement normal de la balance, les directions du courant dans les deux moitiés des grandes bobines sont opposées l'une à l'autre et les directions du courant dans les petites bobines sont telles que la force exercée sur l'une d'elles soit ascendante et sur l'autre descendante. L'équilibre est rétabli approximativement par l'addition de poids à l'un ou à l'autre des plateaux, et la petite résultante des couples électromagnétique et gravifique est évaluée par l'observation de la position d'équilibre et par la mesure de la sensibilité.

Au début des déterminations récentes, la balance fut complètement révisée. En particulier, les arêtes des couteaux et les plans d'appui furent retravaillés, le plan central fut renivelé et les positions des trois arêtes de couteaux furent réajustées, de façon à se trouver coplanaires et parallèles. De plus, un dispositif optique a été installé pour observer la position d'équilibre, de sorte que l'opérateur peut se tenir à plus de 4^m de la balance pour observer les oscillations.

On a construit des bobines neuves pour remplacer les bobines anciennes, qui avaient été détériorées, principalement par l'action de la paraffine dont elles avaient été revêtues. Les bobines actuelles ne portent pas de revêtement, l'isolement résulte donc de l'intervalle de 0^{mm},4 environ qui sépare les fils adjacents; mais étant donné que l'enroulement est à double hélice, il est facile, en déconnectant les hélices adjacentes, d'examiner leur isolement. L'isolement est habituellement de plusieurs milliers de mégohms.

Pour pouvoir calculer la force due à l'unité de courant, il est nécessaire de connaître les dimensions linéaires des bobines. Celles-ci ont été mesurées en 1928 et de nouveau en 1932. Plusieurs mesures du diamètre et de la position axiale ont été effectuées sur chaque tour de toutes les bobines. En plus, les mesures supplémentaires, faites récemment, indiquent que les dimensions des cylindres n'ont pas beaucoup varié pendant les 7 années qui se sont écoulées depuis que les premières mesures ont été effectuées.

Les coefficients thermiques de dilatation linéaire des cylindres ont été aussi mesurés.

En partant des mesures des dimensions linéaires, il est possible de calculer la force avec une précision d'au moins 2 cent-millièmes, ce qui correspond à 1 cent-millième dans la mesure du courant. Cette opinion est confirmée par l'accord qui existe entre les mesures et le calcul de la petite différence des forces exercées par les deux systèmes des bobines. La force due à chacun des systèmes est de 2 grammes-poids environ sous l'action du courant normal de 1,018 ampère.

Entre 1930 et 1935, plus de 125 déterminations complètes du courant furent effectuées. La concordance est bonne, et l'étude des facteurs qui composent l'opération indique que les erreurs systématiques, s'il en existe, ne se montent pas à plus de 1 cent-millième. En plus, une erreur de 1 cent-millième doit être attribuée à l'incertitude dans la connaissance de la valeur de la gravité à Potsdam.

Le résultat final, exprimé en fonction de l'ampère réalisé au National Physical Laboratory au moyen des résistances étalons et des éléments étalons, est :

1 ampère (c. g. s.) = 1,00014 ± 0,00003 ampère international.

Le résultat le plus récent d'une détermination indépendante est celui de H. L. Curtis et W. R. Curtis au National Bureau of Standards à Washington. Ce résultat est exprimé en fonction des bobines de résistance et des éléments étalons du National Bureau of Standards; mais, étant donné que de nombreuses comparaisons entre les bobines et les éléments de deux laboratoires ont été effectuées ces dernières années, il est possible de comparer avec une précision relativement élevée les valeurs de l'ampère fournies par les deux balances. Cette comparaison montre que l'ampère (c. g. s.) déterminé au N. P. L. dépasse environ de 9 cent-millièmes l'ampère (c. g. s.) tel qu'il a été déterminé au N. B. S. Cette différence est plus de quatre fois supérieure à l'erreur maximum du résultat de chaque laboratoire (à l'exclusion de l'erreur sur la valeur de la gravité de Potsdam, valeur qui entre dans les deux déterminations). Les causes possibles de cette divergence ont été recherchées; mais l'explication n'a pas encore été trouvée.

Juillet 1935.

ANNEXE E 8.

Laboratoire Électrotechnique de Tokyo.

RAPPORT ET PROPOSITIONS

PRÉSENTÉS AU

COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

I. — Détermination de l'ohm en valeur absolue.

1. PROCÉDÉS DE MESURES DES DIMENSIONS GÉOMÉTRIQUES DE L'INDUCTANCE SERVANT DE POINT DE DÉPART A LA DÉTERMINATION DE L'OHM. — L'inductance servant de base à la détermination de l'ohm en valeur absolue, unité de résistance, au Laboratoire électrotechnique, est l'étalon absolu d'induction mutuelle du type Campbell, lequel a été fabriqué au National Physical Laboratory et bienveillamment remis (1) au Japon par le Gouvernement britannique.

Sa construction et ses dimensions principales sont les suivantes.

La bobine primaire est un cylindre en marbre d'environ 30^{cm} de diamètre, autour duquel les deux parties supérieure et inférieure sont enroulées; chacune est constituée de 100 spires au pas de 1^{mm} en fil nu de cuivre dur non magnétique, de 0^{mm},6 environ de diamètre. La distance moyenne entre ces deux parties est à peu près 30^{cm}. La bobine secondaire est un cylindre en marbre, ayant une rainure de 1^{mm}² où se trouve un double fil de cuivre, formant 465 spires, guipé de soie et d'environ 0^{mm},48 de diamètre. Son

(1) *N. P. L. Collected Researches*, vol. XXI, 1927, paper 1, p. 1-31.

rayon moyen est réglé de manière à être égal à 25^{cm},7128, rayon d'un cercle neutre déduit de la bobine primaire.

Le Laboratoire électrotechnique a fait de nouvelles mesures du diamètre et des pas de la bobine primaire de l'étalon absolu. La méthode de ces mesures est la même que celle (1) adoptée par le

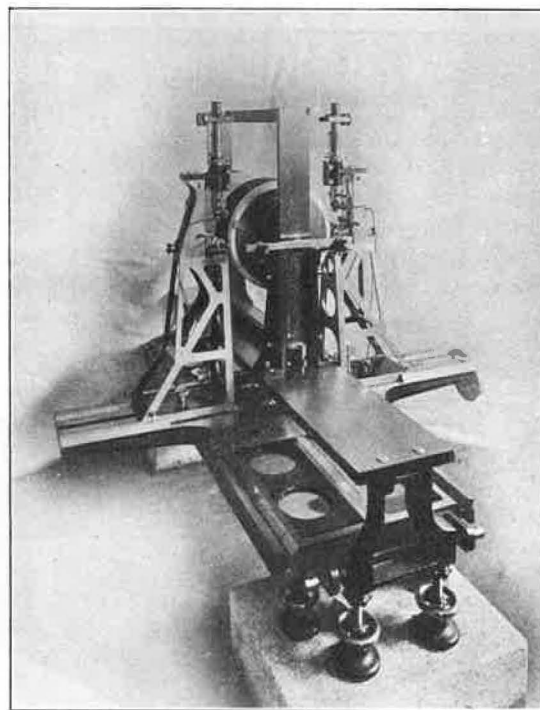


Fig. 1.

National Physical Laboratory en 1927; et elle a pour objet de déterminer les nouvelles valeurs de l'induction mutuelle et les changements des valeurs du diamètre et des pas.

Le comparateur employé a été fabriqué au Japon en s'inspirant de celui de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt (2).

(1) *Loc. cit.*

(2) *Wiss. Abh. d. P. T. R.*, Bd. 5, S. 15.

L'étalon à traits du Laboratoire électrotechnique, qui est l'échelle d'invar n° 549 de la Société Genevoise, a été comparé en 1932 avec le prototype national n° 10 du Japon.

Le comparateur utilisé aux mesures du diamètre de la bobine est représenté par la figure 1.

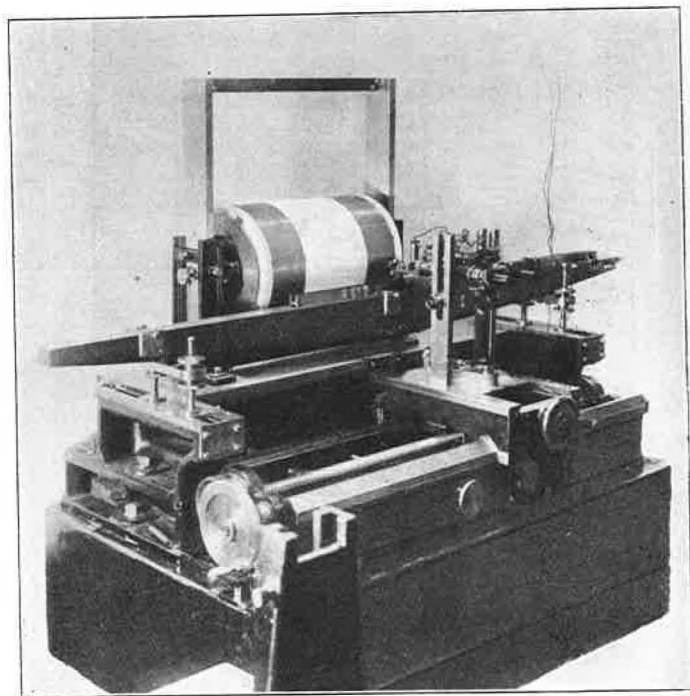


Fig. 1.

En considérant les huit génératrices placées à l'équidistance angulaire de 45° sur la bobine primaire et en faisant des mesures de chaque tour le long des génératrices symétriques par rapport à l'axe de la bobine, le Laboratoire électrotechnique a fait dans l'ensemble quatre mesures du diamètre. Pour ces mesures, on a employé un étalon à bouts sphériques dont la longueur de 30^{mm} est égale au diamètre de la bobine primaire; les dimensions et

coefficients de dilatation ont été obtenus par comparaison avec l'échelle d'invar n° 549.

Le comparateur employé aux mesures des pas est représenté par la figure 2.

Les mesures de chaque spire ont été faites le long des quatre génératrices placées à l'équidistance angulaire de 90° sur la bobine primaire, ce qui fait un ensemble de quatre mesures.

2. MÉTHODE DE CALCUL DE L'INDUCTANCE. — Le Laboratoire électrotechnique est en train de calculer de nouvelles valeurs de l'inductance en utilisant les valeurs obtenues pour le diamètre et les pas de la bobine primaire et en adoptant les formules de J. V. Jones.

Pour la bobine secondaire, dont les dimensions géométriques ne peuvent être mesurées, on applique la correction pour les variations du diamètre du cercle neutre.

3. DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE EN FONCTION DE L'INDUCTANCE. — Le Laboratoire électrotechnique a procédé aux mesures absolues de la résistance, en faisant une comparaison avec l'inductance mutuelle et la résistance, par l'intermédiaire d'un condensateur déterminé en fonction de l'ohm international et de la seconde du temps solaire moyen par le pont de Maxwell; et il a mesuré, en henry international, l'induction mutuelle par le pont de Carey-Foster, en utilisant ce condensateur et l'étalon de résistance. D'autre part, l'induction mutuelle est déterminée en henry absolu par les dimensions géométriques.

Ainsi, le rapport entre les ohms international et absolu peut être obtenu par le rapport trouvé entre les henrys international et absolu. Une brève description sera donnée des mesures absolues de résistance, qui sont en cours d'exécution au Laboratoire électrotechnique.

A. — Comparaisons de l'étalon d'induction mutuelle et de l'étalon absolu. — Le pont (1) représenté dans la figure 3 a été adopté pour permettre les comparaisons entre l'étalon absolu et l'étalon d'induction mutuelle en utilisant le pont de Carey-

(1) *Loc. cit.*

Foster. La fréquence du courant utilisé a été de 15 périodes par seconde.

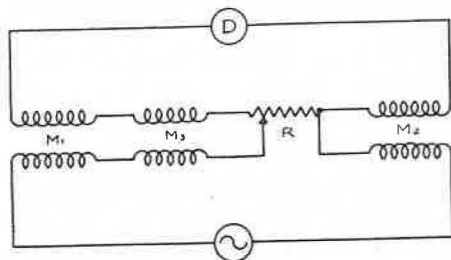


Fig. 3.

On s'est assuré par la comparaison entre l'étalon absolu et l'inductance mutuelle à faibles pertes ⁽¹⁾ (fig. 4) que l'augmen-

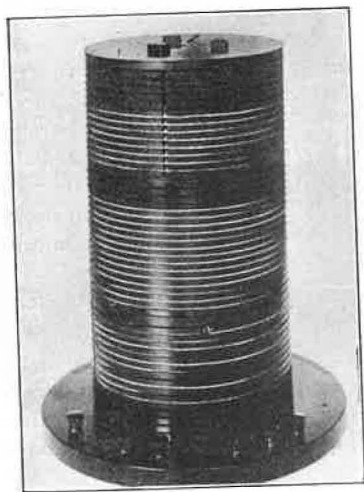


Fig. 4.

tation de l'inductance de l'étalon absolu causée par la fréquence est de l'ordre d'environ 1,0 à 1,2/1000000.

⁽¹⁾ R. YONEDA et T. MATSUMYAMA, *Researches of the Electrotechnical Laboratory*, n° 368, 1934.

B. — Mesures de l'étalon d'induction mutuelle en henry international. — a. Pont de Carey-Foster. — Pour alimenter ce pont, on a employé des courants alternatifs de 15 périodes et 95 périodes. Les dispositions du pont sont montrées par le croquis de la figure 5. Tout le dispositif est connecté par les fils

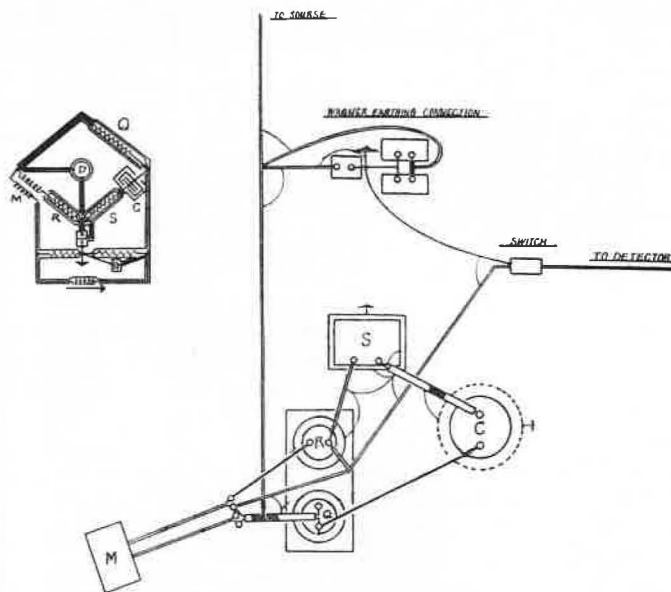


Fig. 5. — Pont de Carey-Foster.

d'armature et beaucoup de soins ont été pris quant à leur place relative, surtout en ce qui concerne la forme des fils connectés aux inductances mutuelles pour diminuer le champ magnétique de dispersion. Cette influence exercée sur les résultats a pu être de l'ordre de 2 à 3/1000000.

Un amplificateur à lampes avait été autrefois adjoint au circuit du galvanomètre pour diminuer le courant de pont; mais on a ainsi obtenu des résultats qui ne sont pas satisfaisants; un étalon de résistance ayant un faible coefficient de température a été alors employé de façon à pouvoir augmenter le courant de

pont et élever sa sensibilité. L'étalon de résistance Q a été fabriqué de façon qu'il ne subisse que de très petites variations pendant son utilisation. Tous les étalons à double blindage sont toujours contenus dans un récipient en verre rempli d'huile à température constante.

Les variations de la résistance durant les 40 à 70 minutes que dure le passage du courant sont de l'ordre de 4 à 10/1 000 000. La constante de temps des résistances Q et S , au cours de leur utilisation, est de l'ordre de 2 à 0,2.10⁻⁸, et l'on s'est assuré que l'influence est négligeable.

Le condensateur est un condensateur à air à plaques d'environ 0,1 μ F, à l'intérieur duquel est adapté un condensateur à air variable d'environ 1000 μ F, et il est disposé de manière à ce qu'on puisse lire environ 0,01 μ F. Son coefficient de température est de l'ordre de 27,4.10⁻⁶.

L'augmentation de la valeur de l'étalon d'induction mutuelle, causée par le changement de la fréquence de 15 à 95 périodes, est, en cours d'utilisation, de l'ordre de 3,4/1 000 000.

L'angle de pertes à 95 périodes est de 1,1.10⁻⁵; son influence peut être négligée. L'augmentation de résistance de la bobine secondaire est de l'ordre de 1.10⁻¹ Ω et a une influence inférieure à 1/1 000 000.

Dans le pont, on a fait passer un courant de 100 à 200 mA; la sensibilité est une déviation d'environ 10^{mm} du galvanomètre pour des variations de 1,2 μ F du condensateur.

b. Pont de Maxwell. — Ce pont a été déjà décrit dans les *Researches of the Electrotechnical Laboratory*, n° 353, 1933, par MM. R. Yoneda et K. Yamaguchi.

4. CONCLUSION. — Le Laboratoire électrotechnique a terminé sa première mesure électrique et les mesures des dimensions géométriques de l'étalon absolu; et il est en train de calculer les valeurs de l'inductance. Dès que les calculs de ces valeurs auront été achevés, les résultats trouvés pour les mesures absolues de la résistance pourront être publiés.

II. — Détermination de l'ampère en valeur absolue.

I. BALANCE DE COURANT EMPLOYÉE A LA DÉTERMINATION DE L'AMPÈRE EN VALEUR ABSOLUE. — La balance de courant employée

à cette détermination, d'une force de 2^{kg}, est du type de Lord Rayleigh (fig. 6); sa sensibilité correspond à une dévia-

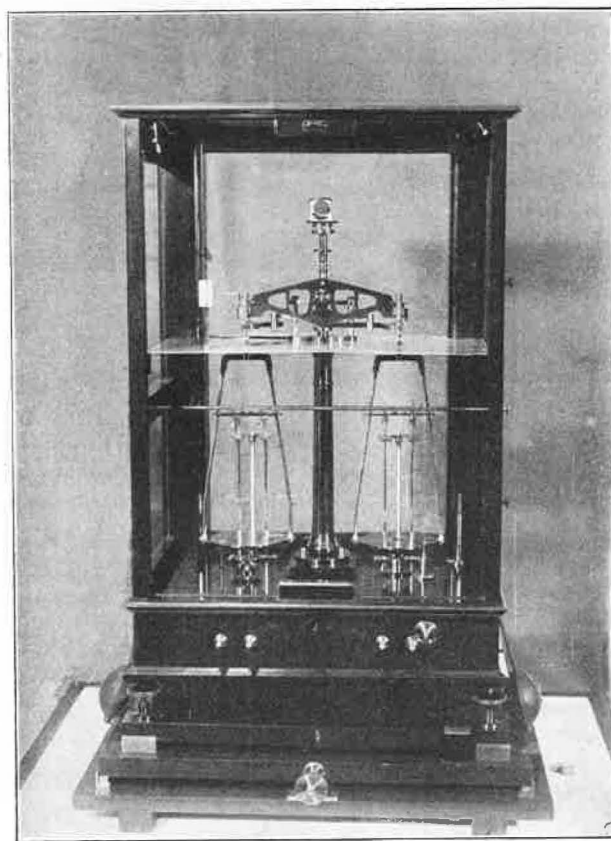


Fig. 6.

tion d'environ 4^{mm} à la distance de 4^m, au cas où, à pleine charge, un poids de sensibilité de 0^{mg},1 a été mis sur un plateau. Elle est disposée de façon qu'on puisse mettre un poids (3^g ou 6^g) et un poids de sensibilité (1^{mg} ou 0^{mg},5) sur les plateaux droit et gauche, par une manœuvre à distance, sans ouvrir les portes de la

cage en verre de la balance. La balance est placée sur un support composé de deux planches qui portent des organes de mouvement hélicoïdal, et l'on peut changer horizontalement sa direction de tous côtés. Au-dessus des deux plateaux ont été montées des tôles minces d'aluminium pour uniformiser la température des bras de la balance. Pour la construction de la balance, on a utilisé comme matériaux du silzinbronze, du bronze ou du bronze phosphoreux, qui ont été trouvés suffisamment amagnétiques par un magnétomètre astatique.

Pour les bobines, on a utilisé les mêmes matériaux que ceux de la balance, et l'on a fait une vérification particulière de leur amagnétisme. Les principales dimensions des bobines sont les suivantes :

	Rayon.	Longueur axiale.	Profondeur radiale.	Nombre de spires.
Bobine mobile.	12 ^{cm} ,4	2 × 0 ^{cm} ,5	2 × 0 ^{cm} ,5	2 × 70
Bobine fixe.	25 ^{cm} ,0	2 × 1 ^{cm} ,0	2 × 1 ^{cm} ,0	2 × 647

Une bobine mobile et deux bobines fixes sont disposées sur la précédente balance; il se produit une force de 6 grammes-poids à peu près, lorsque ces bobines sont traversées par un courant d'environ 0,7 A, puis lorsque le courant est inversé.

2. MÉTHODE DE DÉTERMINATION DES RAPPORTS DES RAYONS EFFECTIFS DES BOBINES. — La méthode électromagnétique a été appliquée à la détermination des rapports des rayons effectifs des bobines. Si les bobines mobile et fixe ont même centre et sont dans un même plan, et si la force magnétique totale au centre des bobines est égale à zéro lorsque le courant convenable a traversé toutes les bobines, le rapport α des rayons effectifs est donné par la relation suivante :

$$\alpha \equiv \frac{a_2}{a_1} = \frac{n_2 I_2}{n_1 I_1},$$

où a_1 est le rayon de la bobine fixe, n_1 le nombre de spires et I_1 l'intensité du courant; a_2 le rayon de la bobine mobile, n_2 le nombre de spires et I_2 l'intensité du courant.

Pour détecter la force magnétique au centre des bobines, on a employé un petit aimant suspendu à un fil de quartz d'environ 2^{mm} de diamètre, et les mesures du courant ont été effectuées

d'après les chutes de tension produites dans les étalons de résistance placés dans le circuit.

Dans ces mesures, un soin particulièrement minutieux a été apporté au réglage de la position des deux bobines. D'abord, les

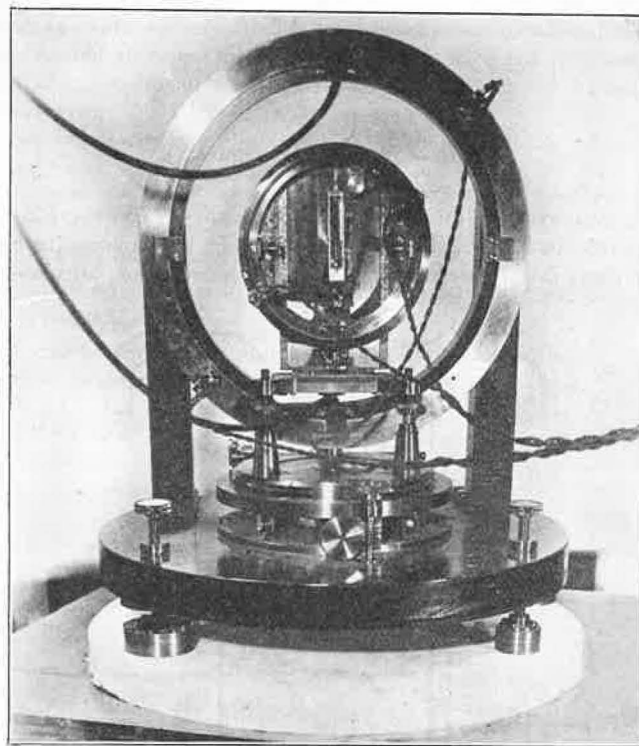


Fig. 7.

bobines et un magnétomètre sont disposés avec même centre et dans le même plan par un procédé mécanique, et sont aussi orientées le mieux possible dans le méridien magnétique.

Leurs positions ont été ensuite minutieusement réglées par une méthode électromagnétique. Ce dispositif de réglage est représenté à la figure 7. Les expériences susmentionnées n'ont été

exécutées qu'entre 2^h et 4^h du matin, moment où il y a peu de perturbations magnétiques.

3. CONCLUSIONS. — Le Laboratoire électrotechnique a déjà terminé sa détermination du rapport des rayons des deux groupes de bobines, et il va réduire le résultat des mesures. Il obtiendra bientôt aussi le résultat définitif des mesures absolues du courant, faites au moyen de ces bobines et de la balance de courant.

III. — Étalons électriques.

1A. ÉTALONS DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE. — La manganine employée au Laboratoire, qui est fabriquée au Laboratoire des matériaux métalliques de la Ville de Sendai, a la composition sui-

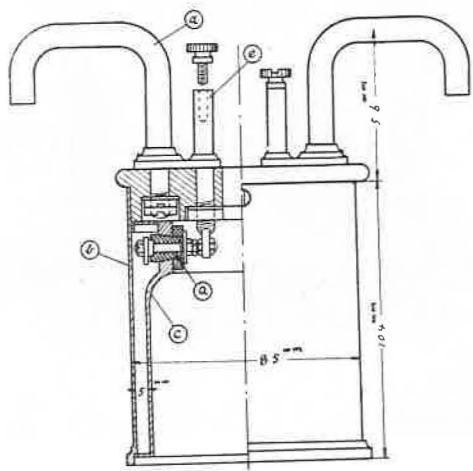


Fig. 8.

vante : Cu 84 pour 100, Mn 3 pour 100 et Ni 3 pour 100; ces métaux sont très purs et il ne reste qu'une trace de fer. Sa résistance est à peu près de $50 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ à 20°C . Le coefficient de température de sa résistance est très petit, et présente son maximum à 25°C . environ.

Cette manganine, découpée après son étirage, est enroulée autour d'un corps de bobine, puis laquée. Le vieillissement est ensuite fait pendant plus de 30 heures à 140°C . La nouvelle forme du corps de bobine est représentée par la figure 8.

Les cylindres sont doubles, comme le montre la figure 8, et les deux cylindres sont soudés aux deux extrémités, en haut et en bas. L'espace réservé entre les deux est de 5 mm ; les fils de manganine y sont enroulés. Le quartz ou l'ambroïde sont utilisés pour l'isolement.

Les caractéristiques de ce nouvel étalon sont :

- a, qu'il peut subir un long transport grâce à sa construction robuste;
- b, qu'il a un bon isolement;
- c, qu'il ne subit pas l'influence de l'humidité, etc., puisqu'il est hermétiquement fermé;
- d, que les bornes de courant, comme celles de potentiel, sont montées symétriquement.

Il y a peu de temps que cet étalon de résistance a été fabriqué et sa stabilité est bonne, comme le montre le tableau suivant :

N° 34050. — Fabriqué le 25 août 1934.

Dates des mesures.	Résistance à 20°C . (ohm international).
28 septembre 1934.....	1,000 117
6 novembre 1934.....	1,000 116
27 mai 1935.....	1,000 115
1 ^{er} juillet 1935.....	1,000 116

En ce qui concerne l'étalon de résistance de platine, le Laboratoire a fabriqué récemment deux étalons de 1Ω avec des fils de platine de $0^{\text{mm}},8$ et $0^{\text{mm}},6$, dont on n'est pas encore en mesure d'affirmer la stabilité.

1B. ÉLÉMENTS ÉTALONS. — Le Laboratoire électrotechnique n'employait autrefois que des éléments étalons Weston comportant de l'électrolyte neutre; cependant, au bout d'une longue période, le sulfate mercurieux utilisé comme pâte s'est coloré en jaune et la force électromotrice s'est affaiblie d'une manière gra-

duelle. Depuis qu'on a fabriqué en 1921 ⁽¹⁾ des éléments étalons Weston comportant de l'électrolyte acide, le Laboratoire s'est intéressé lui-même ⁽²⁾ aux études dans ce domaine, et il est arrivé à la conclusion que l'électrolyte acidifié au moyen de SO^2H^2 de concentration à 0,05 N permet d'améliorer beaucoup la stabilité de la force électromotrice et qu'il peut diminuer l'hystérésis. Le Laboratoire emploie ce groupe d'éléments acides pour contrôler la force électromotrice du groupe de référence d'éléments neutres.

La figure 9 représente comparativement la stabilité d'éléments

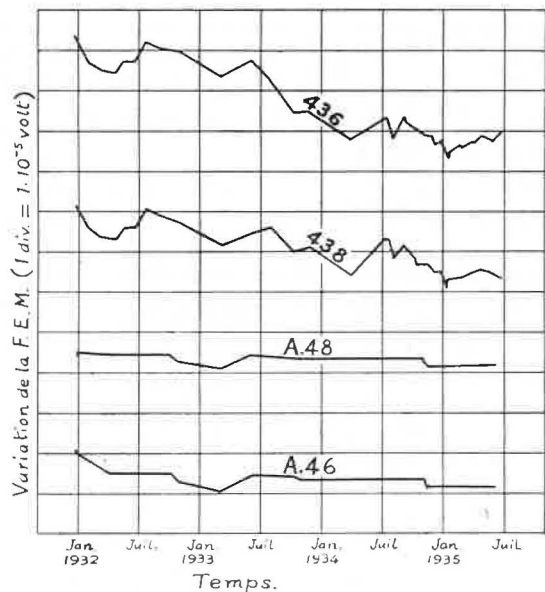


Fig. 9.

étalons Weston saturés ayant des électrolytes neutre et acide. Dans cette figure, les éléments nos 436 et 438, qui ont été fabriqués le 27 novembre 1931, contiennent de l'électrolyte neutre, et

⁽¹⁾ J. OBATA et Y. ISHIBASHI, *Researches of the Electrotechnical Laboratory*, n° 88, 1921.

⁽²⁾ Y. ISHIBASHI et T. ISHIZAKI, *Researches of the Electrotechnical Laboratory*, n° 318, 1931.

les éléments nos A. 46 et A. 48, fabriqués le 26 novembre 1931, de l'électrolyte acide à 0,05 N.

Ces derniers ont donné de bons résultats à l'occasion des dernières comparaisons internationales ⁽¹⁾. Cette figure montre bien que les éléments acides saturés jouissent d'une bien meilleure stabilité de force électromotrice que les éléments neutres saturés.

Donc, il est recommandé que tout laboratoire emploie à l'avenir les éléments étalons Weston acides saturés pour la conservation des unités de force électromotrice.

2. TEMPÉRATURE NORMALE POUR LES ÉTALONS ÉLECTRIQUES. — La température atmosphérique de Tokyo est presque égale à celle de Washington, et sa plus haute température moyenne s'élève en août aux environs de 25°,6 C. Donc la température de 25° C. est plus favorable que 20° C., comme température normale, dans la comparaison internationale des étalons électriques.

Dans le cas où la température normale des étalons électriques aurait été déterminée, les formules de coefficients de température des étalons de résistance et des éléments étalons devront être fixées dans les limites d'environ $\pm 10\%$ C., en se basant sur la température normale déterminée. On n'a pas encore pris l'habitude d'annexer les formules des coefficients de température aux éléments étalons; mais il est recommandé d'annexer ces formules à tout élément étalon, de même qu'aux étalons de résistance.

IV. — Comparaisons internationales des unités.

1. COMPARAISONS ENTRE LES ÉTALONS DE RÉSISTANCE ET ENTRE LES ÉLÉMENTS ÉTALONS. — Le Laboratoire électrotechnique a procédé récemment aux comparaisons internationales, en collaboration avec le Bureau international des Poids et Mesures, des unités de résistance et de force électromotrice au moyen de deux de ses étalons de résistance de manganine et de quatre éléments étalons Weston. Il est aussi en train de faire des comparaisons entre ses étalons et les trois éléments étalons du National Bureau of Standards apportés par M. le Dr La Gorce, de la National Geographic Society.

⁽¹⁾ Voir la page 277.

2. MODE ET FORMALITÉS DE TRANSPORT DES ÉTALONS ÉLECTRIQUES.
— Par le procédé suivant, le Laboratoire électrotechnique a transporté sans aucune altération ses deux étalons de résistance et ses quatre éléments étalons au Bureau international des Poids et Mesures, en vue des comparaisons internationales. Ces étalons ont été transportés par mer, sous forme de valise diplomatique, et adressés au Consulat du Japon à Marseille par les bons soins du Ministère des Affaires étrangères et de la N. Y. K. (Nippon Yusen Kaisha). Ils ont été ensuite transportés à l'Ambassade du Japon à Paris et remis au Bureau international des Poids et Mesures, et la même voie a été suivie pour leur retour.

Boîte de transport et emballage : a. Éléments étalons. — La boîte de transport des éléments étalons est composée de trois

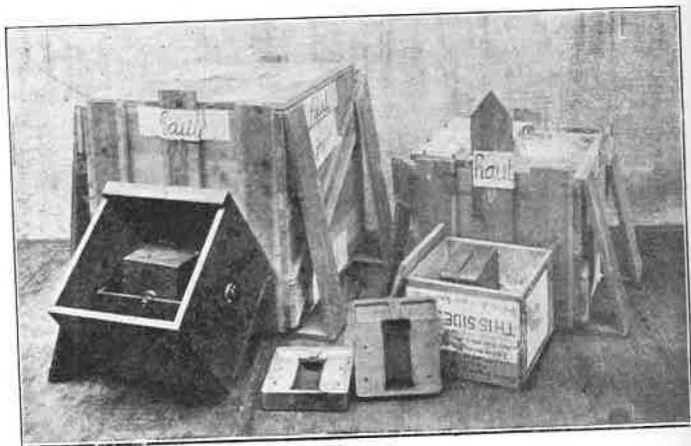


Fig. 10.

caisses, entre lesquelles sont interposés et pressés des copeaux de bois ou de coton.

La caisse extérieure ($53 \times 53 \times 54^{\text{cm}}$) est disposée de sorte qu'il soit difficile de la coucher sur un côté, comme le montre la figure 10. La dernière caisse comporte encore intérieurement une caissette ($12 \times 12 \times 14^{\text{cm}}$) suspendue, qui peut tourner autour de deux axes respectivement rectangulaires, de sorte que les quatre éléments étalons restent toujours verticaux.

b. Étalons de résistance. — La boîte de transport des étalons est composée de deux caisses, l'une extérieure ($40 \times 40 \times 37^{\text{cm}}$) et l'autre intérieure ($25 \times 25 \times 20^{\text{cm}}$) qui se trouvent à droite de la figure. Son mode d'emballage intérieur est le même que celui des éléments étalons. Les étalons de résistance sont placés entre deux blocs de bois (au premier plan de la figure) évidés et épousant la forme des étalons.

c. Modifications des étalons électriques causées par les transports. — Les caisses extérieures ont été plus ou moins endommagées, mais les étalons n'ont eu aucun dommage. En particulier, pour les éléments étalons, on n'a trouvé aucune trace de renversement. Il s'ensuit que les étalons ont subi peu de changements, et l'on a obtenu les résultats inscrits au tableau ci-après.

Ce mode de transport, expérimenté pour la première fois, a donné d'aussi bons résultats que l'envoi des étalons par les bons soins de voyageurs. Il sera appliqué aux futures comparaisons internationales des étalons électriques.

Éléments étalons.				Étalons de résistance.	
N° 171.	N° 266.	N° A. 46.	N° A. 48.	N° 2905.	N° 2906.

Avant le transport pour le Bureau international :

1,01828 ₂	1,01828 ₂	1,01828 ₄	1,01828 ₄	1,00020 ₃	1,00010 ₇
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

Après le retour à l'E. T. L. :

1,01829 ₁	1,01828 ₂	1,01829 ₃	1,01829 ₄	1,00020 ₁	1,00010 ₅
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

Changements :

+9 μ V	+7 μ V	+9 μ V	+10 μ V	-2 μ Ω	-2 μ Ω
------------	------------	------------	-------------	-------------------	-------------------

V. — Sous-Comité technique.

Le Laboratoire électrotechnique exprime le désir que le Sous-Comité technique soit réuni entre juin et décembre 1936 en vue de déterminer les valeurs des nouvelles unités électriques basées sur les mesures absolues des divers Laboratoires nationaux.

VI. — Questions diverses.

1. ADOPTION DES NOUVELLES UNITÉS ÉLECTRIQUES. — Le Laboratoire électrotechnique, comme le délégué⁽¹⁾ du Japon l'a indiqué à la session de la Huitième Conférence générale des Poids et Mesures, demande que le Comité consultatif d'Électricité de 1936 et le Comité international des Poids et Mesures prennent des dispositions appropriées pour la rédaction des articles nécessaires à la législation des divers gouvernements, à l'occasion de l'adoption des nouvelles unités électriques.

2. CONSERVATION DES NOUVELLES UNITÉS ÉLECTRIQUES. — Le Laboratoire électrotechnique demande que le Comité consultatif d'Électricité prenne des mesures appropriées pour la conservation et l'unification internationale des nouvelles unités électriques, après l'adoption de ces unités, étant donnée la grande importance de cette question.

Août 1935.

⁽¹⁾ *Comptes rendus des séances de la Huitième Conférence générale des Poids et Mesures*, op. 53 et 88.

ANNEXE E9.

Bureau international des Poids et Mesures.

RAPPORT

SUR

LES COMPARAISONS DES ÉTALONS NATIONAUX
DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

Par MM. A. PÉRARD et M. ROMANOWSKI.

Depuis le début des travaux électriques au Bureau international des Poids et Mesures, il a été exécuté quatre grands ensembles ou groupes de comparaisons entre les différents étalons de résistance déposés au Pavillon de Breteuil par les Laboratoires nationaux. Les deux premiers groupes, datant l'un de novembre-décembre 1932, l'autre de juin-juillet 1933, sont pour ainsi dire incomplets, en ce sens que, d'entre les six grands Laboratoires nationaux d'Allemagne, des États-Unis, de France, de Grande-Bretagne, du Japon et de l'U. R. S. S., deux, le National Bureau of Standards de Washington, et l'Institut de Métrologie et de Standardisation⁽¹⁾ de Leningrad, n'y étaient pas encore représentés. Seuls les deux groupes les plus récents ayant eu lieu respectivement à la fin de l'année 1933 (jour central, 29 novembre 1933) et au printemps 1935 (jour central, 15 mars 1935), semblent avoir atteint une forme définitive tant au point de vue des étalons qui y figurent, qu'au point de vue du schéma général des intercomparaisons effectuées.

La méthode utilisée dans toutes les expériences a été celle du

⁽¹⁾ Devenu depuis cette époque l'Institut de Métrologie de l'U. R. S. S.

pont double de Thomson, telle qu'elle a été décrite dans la relation qui a suivi notre premier travail et qui se trouve insérée en annexe des *Procès-Verbaux du Comité international des Poids et Mesures* (2^e série, t. XVI, p. 70). Cette méthode comportait la substitution, place pour place, dans une même branche du pont, des bobines comparées deux à deux, l'égalisation des branches étant obtenue par des shunts réglables, de l'ordre d'une dizaine de mille ohms, connectés aux extrémités des deux résistances. Quelques perfectionnements de détail ont seulement été apportés, au moment des dernières comparaisons, dans le repérage de la position du spot, mieux délimité sur l'échelle graduée, et dans la lecture des températures au moyen de thermomètres à double graduation, observés avec une lunette mobile en hauteur.

Les étalons, qui ont participé à ces études, constitués par des bobines de manganine, sont énumérés ci-dessous avec l'indication du laboratoire auquel ils appartiennent :

R (3751), R' (3072) et R'' (2836) à la Physikalisch-Technische Reichsanstalt (P. T. R.) de Berlin;

S (85), S' (86) et S'' (87) au National Bureau of Standards (N. B. S.) de Washington;

C (7413), C' (3962) et C'' (7414) au Laboratoire Central d'Électricité (L. C. E.) de Paris;

N (645) et N' (643) au National Physical Laboratory (N. P. L.) de Teddington;

E (2906) et E' (2905) à l'Electrotechnical Laboratory (E. T. L.) de Tokyo;

M (6) et M' (8) à l'Institut de Métrologie et de Standardisation (I. M. S.) de Léningrad;

V (7472) et V' (7482) au Bureau National des Mesures (B. N. M.) de Varsovie;

I₁ (7247), I₂ (7244), I₁' (7246), et I₂' (7243) au Bureau international des Poids et Mesures (B. I. P. M.).

Les caractéristiques des étalons R, R', C, C', N, N', E, E', I₁, I₂, I₁', I₂' ont déjà été données précédemment; nous avons seulement à rectifier certains coefficients thermiques, qui avaient été admis *a priori* et dont nos expériences ultérieures ont fait ressortir l'inexactitude; ce sont :

Étalons.	Coefficients thermiques	
	α.	β.
C (7413).....	+ 17,95	— 0,36
C' (3962).....	+ 16,63	— 0,48
I ₁ (7247).....	+ 16,62	— 0,53
I ₂ (7244).....	+ 16,26	— 0,51
I ₁ ' (7246).....	+ 16,94	— 0,34
I ₂ ' (7243).....	+ 16,55	— 0,56

Ci-après sont données les caractéristiques des bobines qui n'avaient pas été présentes au premier groupe de comparaisons.

Le schéma des comparaisons du premier groupe exécutées entre les étalons R, R', C, C', N, N', E, E', I₁, I₁', I₂, I₂' a été exposé en détail dans la Note précitée, et il n'y a pas lieu d'y revenir. Nous devons seulement signaler que pour différentes raisons (inexactitude des coefficients thermiques, élimination de l'une des bobines étalons françaises, accommodation des valeurs attribuées aux bobines japonaises pour tenir compte des valeurs communiquées ultérieurement après le retour de ces instruments à leur laboratoire d'origine), les résultats qui figurent dans cette première Note n'étaient que provisoires; et l'on doit considérer comme résultats définitifs ceux qui sont donnés à la fin du présent Rapport.

Dans le deuxième groupe (juin-juillet 1933), où figuraient les mêmes étalons que dans le premier (excepté R' remplacé par R''), le schéma des comparaisons était notablement simplifié, chaque ohm étant comparé seulement à trois autres, de façon d'ailleurs parfaitement symétrique. Les opérateurs n'ont fait chacun qu'une seule fois toutes les comparaisons, le second opérateur suivant l'ordre exactement inverse du premier. Le jour central de ces comparaisons se trouva être le 6 juillet 1933. Ce schéma conduisant à des calculs compliqués n'a pas été retenu pour les opérations ultérieures.

Pour les troisième et quatrième groupes, nous avons adopté le schéma suivant : Un des étalons de chaque laboratoire, considéré comme étalon primaire, a été comparé avec tous les autres semblables dans toutes les combinaisons possibles deux à deux, l'autre ou les autres étalons du même laboratoire étant seulement rattachés à l'étalon primaire par comparaison directe (ou en série fermée). L'ensemble des comparaisons des étalons primaires four-

Institut.	Symbole adopté.	Constructeur.	N ^o .	Coefficient thermique.	Type.	Particularité d'emploi.
P. T. B.	R ^o	Otto Wolff	2836	$\alpha = + 11,7$ $\beta = - 0,40$	ouvert, à prises de potentiel extérieures.	maintenu à l'état hygrométrique 1/2.
L. C. E.	C ^o	"	7414	$\alpha = + 17,9$ $\beta = 0$ (admis)	id.	
N. B. S.	S	N. B. S.	85	$\alpha = + 4,5$ $\beta = - 0,46$	fermé, à prises de potentiel intérieures.	
"	S'	"	86	$\alpha = + 5,6$ $\beta = - 0,48$	id.	
"	S''	"	87	$\alpha = + 5,6$ $\beta = - 0,48$	id.	
I. M. S.	M	I. M. S.	6	$\alpha = + 17,0$ $\beta = - 0,52$	id.	
"	M'	"	8	$\alpha = + 17,7$ $\beta = - 0,53$	id.	

nissait ainsi un nombre de différences $n(n-1)/2$ beaucoup plus élevé que celui des inconnues (différences indépendantes, au nombre de $n-1$). Le calcul de compensation que l'on avait à faire pour arriver aux valeurs les plus probables des différences, faisait ressortir les erreurs résiduelles de toutes les expériences susceptibles de donner par leur grandeur une évaluation de la précision obtenue.

Le troisième ensemble (novembre-décembre 1933) a fait intervenir tous les ohms énumérés plus haut, à l'exception de I₁ et I₂, momentanément absents du Bureau international, et de C^o (7414) qui ne fut introduit que plus tard dans les travaux. Les opérateurs ont exécuté l'un et l'autre le travail complet aller et retour, le retour consistant à reprendre en sens inverse toutes les comparaisons exécutées d'abord dans un ordre déterminé; ainsi se trouvait éliminée, en première approximation dans les moyennes, la marche lente avec le temps des divers instruments comparés; et les moyennes ont été rapportées au jour moyen du travail. Le jour moyen du premier observateur a été le 15 novembre, celui du deuxième observateur le 14 décembre, et en moyenne pour les deux observateurs le 29 novembre 1933. Le schéma de ces comparaisons s'est trouvé légèrement perturbé par le fait que l'étalon C (7413) du Laboratoire Central d'Électricité, considéré comme primaire lors des comparaisons précédentes et qui avait donné des signes d'instabilité, a été remplacé dans les expériences de l'un des observateurs par l'étalon C' (3962).

Le quatrième ensemble (février-mars 1935) a été en tous points semblable au précédent. Toutefois l'étalon C (7413) a été définitivement écarté des comparaisons d'un commun accord avec le Laboratoire Central d'Électricité, l'étalon C' (3962) est devenu l'étalon primaire, et le L. C. E. a fourni un nouvel étalon secondaire C'' (7414). Les deux opérateurs ont pu alors exécuter des comparaisons absolument identiques. Le jour moyen pour l'ensemble des deux observateurs a été le 15 mars 1935. Les étalons V et V' n'étant pas revenus de Varsovie après la comparaison précédente n'ont pas participé à la mesure, ainsi que les étalons I₁ et I₂, toujours absents. Les ohms I₁' et I₂' ont été rattachés aux étalons nationaux par l'intermédiaire de l'étalon M'(8). Deux nouveaux ohms commandés par le Bureau international à la maison Otto Wolff ont été également rattachés aux autres, au début et à la fin des expériences, par l'intermédiaire de l'étalon N' (643).

Le coefficient thermique de tous les ohms étant bien connu, soit par des études faites dans leur laboratoire d'origine, soit par des déterminations effectuées au Bureau international, toutes les expériences ont été exécutées au voisinage immédiat de 20° et réduites exactement à cette température, au moyen des coefficients signalés plus haut, sauf pour les étalons N (643) et N' (643), pour lesquels nous nous sommes servis de valeurs plus récentes que le N. P. L. nous avait communiquées en mai 1934 et qui sont

	α.	β.
N (643).....	—3,57	—0,385
N' (643).....	—3,34	—0,385

Valeurs communiquées par les Laboratoires nationaux.

Le but de ces expériences étant principalement de suivre les rapports des diverses unités nationales, il était nécessaire de connaître les valeurs attribuées par chaque laboratoire à ses propres étalons, à la date même de nos expériences. En raison de son éloignement l'E. T. L. a seulement fixé les valeurs des siens une fois avant toutes nos études, une autre fois à la fin du troisième ensemble, et une dernière fois après le quatrième; tous les autres laboratoires ont pu exécuter des déterminations avant et après chacune de nos expériences. Nous ne saurions trop exprimer aux divers laboratoires notre reconnaissance pour la complaisance avec laquelle ils se sont astreints à ces déterminations répétées et aux formalités qu'ont exigées les transports.

Le tableau des valeurs ainsi communiquées et des nombres interpolés par nous (en italique) aux dates mêmes de nos expériences est donné ci-après.

TABEAU I. — Valeurs des étalons communiquées par les divers laboratoires et valeurs interpolées en fonction de chaque unité nationale.

	1 ^{er} groupe :		2 ^e groupe :		3 ^e groupe :		4 ^e groupe :	
	15 juin 1932.	30 déc. 1932.	15 juin 1933.	6 juillet 1933.	29 nov. 1933.	21 mars 1934.	15 janv. 1934.	1 ^{er} août 1935.
R (3751)...	1,000034 ₀	<i>1,000031₀</i>	1,000032 ₀	<i>1,000032₀</i>	<i>1,000030₀</i>	1,000034 ₀	1,000032 ₀	1,000034 ₀
R' (2836)...	—	—	1,000135 ₀	<i>1,000135₀</i>	1,000140 ₀	1,000144 ₀	1,000148 ₀	1,000150 ₀
S (85).....	—	—	—	—	0,999525 ₀	0,999525 ₀	0,999525 ₀	0,999525 ₀
S' (86).....	—	—	—	—	0,999525 ₀	0,999525 ₀	0,999525 ₀	0,999525 ₀
C (7413)...	0,999959 ₀	<i>0,999959₀</i>	—	—	<i>0,999957₀</i>	0,999957 ₀	0,999957 ₀	—
C' (3902)...	0,999991 ₀	<i>0,999992₀</i>	—	—	0,999995 ₀	0,999995 ₀	0,999997 ₀	1,000000 ₀
C'' (7414)...	—	—	—	—	—	—	0,999959 ₀	0,999964 ₀
N (643)...	0,999932 ₀	<i>0,999988₀</i>	—	—	0,999990 ₀	0,999991 ₀	—	0,999997 ₀
N' (643)...	0,999940 ₀	<i>0,999938₀</i>	—	—	0,999940 ₀	0,999941 ₀	—	0,999948 ₀
E (2906)...	1,000098 ₀	<i>1,000098₀</i>	—	—	<i>1,000100₂</i>	1,000100 ₂	1,000106 ₂	1,000105 ₀
E' (2905)...	1,000206 ₀	<i>1,000202₁</i>	—	—	<i>1,000198₂</i>	1,000197 ₂	1,000202 ₂	1,000201 ₀
M (6).....	—	—	—	—	0,999960 ₀	0,999960 ₀	—	0,999956 ₀
M' (8).....	—	—	—	—	0,999949 ₀	0,999949 ₀	—	0,999944 ₀

Pour ce qui concerne les États-Unis, il a été possible, en s'appuyant sur des comparaisons faites par le National Bureau of Standards en juillet et août 1932, de déterminer, dès les premières expériences, son unité par l'intermédiaire de l'unité britannique et de l'unité allemande, et par suite de rattacher tous nos résultats, même ceux de fin 1932, à l'unité américaine.

Mais pour l'U. R. S. S., les comparaisons extérieures les plus proches dont nous disposions dataient de fin 1929 et début 1930, et nous n'avons pu nous relier à l'unité correspondante qu'à partir du troisième ensemble de comparaisons.

Résultats.

En vue d'exprimer tous les résultats de nos travaux, qui ne donnent que des rapports, des différences, et non des grandeurs absolues, nous avons à faire choix d'une unité. Pour ne pas risquer de paraître arbitraire, notre choix ne pouvait alors se fixer autrement que sur l'unité moyenne Ω_m^0 des six grands laboratoires nationaux, désignés nominativement, par le Comité international des Poids et Mesures, pour être représentés dans son Comité consultatif d'Électricité (séance du 8 octobre 1927, *Procès-Verbaux des séances du Comité international*, 2^e série, t. XII, 1928, p. 84).

Les résultats du premier ensemble de comparaisons avaient été donnés à l'origine en fonction de l'unité moyenne des quatre premiers laboratoires qui nous avaient confié leurs étalons. Nous venons de voir que l'unité américaine avait pu être rattachée à ce travail, mais qu'il n'en avait pas été de même de l'unité U. R. S. S. La comparaison des résultats successifs ne pouvant se faire que par le moyen d'une unité commune, ceux-ci devraient normalement être exprimés dans une unité transitoire où n'interviendrait pas Ω_0 . Toutefois, pour éviter la répétition de tableaux de nombres, différant entre eux d'une quantité constante, nous supposons que l'unité U. R. S. S. est restée, depuis 1932 jusqu'à maintenant, dans le même rapport avec la moyenne des unités des cinq autres laboratoires, de façon à pouvoir exprimer la totalité de nos résultats dans cette même unité Ω_m^0 , dont la grandeur n'est en réalité connue que depuis notre troisième groupe de comparaisons. Ainsi pourra-t-on suivre la marche des étalons et la lente évolution relative des diverses unités dans les deux tableaux suivants qui donnent l'ensemble de nos résultats.

TABLEAU II. — Valeurs successives des étalons à 20°C.

	30 déc. 1932.	6 juillet 1933.	29 nov. 1933.	15 mars 1935.
R (3731)	1,000 0274 Ω_m^0	1,000 0230 Ω_m^0	1,000 0237 Ω_m^0	1,000 0230 Ω_m^0
R ^o (2836)	—	1,000 1422	1,000 1419	1,000 1429
S (83)	—	—	0,999 5079	0,999 5077
S' (86)	—	—	0,999 5061	0,999 5089
S'' (87)	—	—	0,999 4963	0,999 4984
C (7413)	1,000 0329	1,000 0333	1,000 0460	—
C' (3962)	1,000 0344	1,000 0342	1,000 0562	1,000 0542
C'' (7414)	—	—	—	—
N (665)	0,999 9734	0,999 9732	0,999 9733	1,000 0542
N' (643)	0,999 9226	0,999 9221	0,999 9229	1,000 0190
E (2906)	1,000 0796	1,000 0793	1,000 0794	0,999 9813
E' (2905)	1,000 1792	1,000 1790	1,000 1788	0,999 9220
M (6)	—	—	0,999 9377	1,000 0844
M' (8)	—	—	0,999 9446	1,000 1786
V (7472)	—	—	0,999 9873	0,999 9551
V' (7482)	—	—	1,000 0266	0,999 9436
I ₁ (7247)	1,000 0242	1,000 0273	—	—
I ₁ ' (7246)	1,000 0207	1,000 0376	1,000 0392	1,000 0139
I ₂ (7244)	1,000 0612	1,000 0618	—	—
I ₂ ' (7243)	1,000 0559	1,000 0662	1,000 0663	1,000 0468

TABLEAU III. — Valeurs successives des unités nationales, rapportées à l'unité moyenne des six laboratoires.

	30 déc. 1932.	6 juillet 1933.	29 nov. 1933.	15 mars 1935.
Allemagne... $\Omega_A =$	0,999995 ₄ Ω_m^6	0,999998 ₇ Ω_m^6	0,999998 ₄ Ω_m^6	0,999998 ₂ Ω_m^6
États-Unis... $\Omega_E =$	0,999981 ₉	0,999982 ₄	0,999981 ₄	0,999982 ₉
France... $\Omega_F =$	1,000061 ₈	1,000058 ₇	1,000060 ₈	1,000057 ₉
Gr-Bret... $\Omega_G =$	0,999984 ₂	0,999983 ₄	0,999982 ₆	0,999984 ₃
Japon... $\Omega_J =$	0,999979 ₀	0,999979 ₁	0,999979 ₅	0,999977 ₂
U. R. S. S... $\Omega_U =$	—	—	0,999997 ₃	0,999999 ₀

Les nombres de ce deuxième tableau sont individuellement la moyenne des valeurs, généralement concordantes, données par les deux étalons de chaque laboratoire national. Le calcul de l'unité française n'est cependant basé, pour les trois premières comparaisons, que sur un seul étalon C (3962); car, sitôt l'élimination de C (7413) décidée, nous avons aussi fait disparaître des calculs, ce qui était basé sur cet étalon. Dans le quatrième ensemble l'unité française a été représentée comme les autres par deux bobines.

Précision des résultats. — Une première idée de la précision des résultats ainsi obtenus est donnée par l'examen des erreurs résiduelles dans les tableaux de compensation des troisième et quatrième groupes de comparaisons, où chaque observateur, par la moyenne de ses deux expériences (aller et retour), a obtenu deux fois 15 équations entre 5 inconnues. Sur les 60 erreurs résiduelles, ainsi calculées à partir des valeurs les plus probables, 41 se trouvent inférieures ou égales au dixième de microhm, et 19 seulement sont supérieures à ce chiffre (1). L'erreur probable d'une quelconque de nos expériences doubles serait voisine de 8 centièmes de microhm, et l'erreur probable de chacun des résultats compensés ne dépasserait guère quelques centièmes de microhm. Si l'on ne regardait que la grandeur de ces erreurs rési-

(1) Encore convient-il de noter que les trois plus fortes erreurs résiduelles, respectivement de 0,30, 0,28 et 0,25 $\mu\Omega$, se rapportent à l'étalon E, dans lequel, en l'absence de prises de potentiel faisant partie de l'étalon, on peut certainement incriminer les variations de résistance des contacts aux extrémités dans les godets de mercure.

duelles, on serait donc tenté d'estimer que le dixième de microhm, dernier chiffre inscrit dans les nombres ci-dessus, présente une réelle garantie d'exactitude.

Mais il ne faut pas perdre de vue les conditions toujours identiques à elles-mêmes dans lesquelles ont été exécutées toutes les comparaisons : température du bain d'huile où baignent les étalons, parfaitement stable depuis de longues heures à 1 ou 2 dixièmes de degré autour de 20°, intensité du courant de mesure toujours égale à 0,1 A, et ne passant dans les bobines à comparer que durant un intervalle de quelques secondes, à très peu près le même chaque fois, au cours duquel un étalon déterminé subit un échauffement, sans doute appréciable, mais à peu près de même valeur dans toutes les expériences. En outre, un grand nombre des bobines qui ont pris part à ces comparaisons ne comportent pas elles-mêmes le degré de stabilité qui correspondrait à la précision du dixième de microhm; la plupart encore manifestent de l'hystérésis, après toute élévation, même faible, de la température. Enfin, il faut, ici comme dans toutes les expériences, faire la grande part des erreurs systématiques ignorées qui entachent les instruments utilisés.

Comme conclusion, on pourrait, semble-t-il, admettre que, si l'on disposait d'étalons de résistance parfaitement stables, dépourvus d'hystérésis, et possédant un coefficient thermique très bas, une précision de l'ordre de 0,2 $\mu\Omega$ dans de semblables expériences ne serait plus illusoire. Mais en l'état actuel des étalons mis à notre disposition, il est nécessaire d'élargir la marge de l'incertitude jusqu'au demi-microhm. Cette exactitude relative du demi-millionième, mérite encore d'être appréciée; son ordre de grandeur n'est guère moins bon que celui que l'on peut espérer de la part de simples étalons de longueur.

Additif.

A la présente réunion du Comité consultatif, le délégué du Laboratoire Central d'Électricité ayant annoncé l'intention de son laboratoire de ramener son unité à la moyenne de celle des cinq autres laboratoires, il est intéressant d'exprimer ci-dessous les valeurs des unités rapportées à cette moyenne préconisée par le Comité consultatif dans sa Résolution 4, et que l'on appellera :

$$\Omega_M = \frac{1}{5} (\Omega_A + \Omega_E + \Omega_G + \Omega_J + \Omega_U).$$

TABEAU IV. — Valeurs des unités nationales rapportées à la moyenne Ω_M .

	29 nov. 1933.	15 mars 1935.
Allemagne.....	$\Omega_F = \Omega_M + 10,6$	$\Omega_M + 9,8$
Etats-Unis.....	$\Omega_F = - 6,4$	$- 5,5$
Grande-Bretagne.....	$\Omega_G = - 5,2$	$- 3,6$
Japon.....	$\Omega_J = - 8,3$	$- 11,2$
U. R. S. S.....	$\Omega_U = + 9,5$	$+ 10,6$
France.....	$\Omega_F = + 73,0$	$+ 69,5$
	Ω_F (nouv)	$0,0$

Pour exprimer en fonction de cette dernière unité les valeurs successives des étalons eux-mêmes, il suffit de majorer de $11,6 \cdot 10^{-6}$ chacun des nombres portés au tableau II.

ANNEXE E10.

Bureau International des Poids et Mesures.

RAPPORT

sur

LES COMPARAISONS DES ÉTALONS NATIONAUX
DE FORCE ÉLECTROMOTRICE

Par MM. M. ROMANOWSKI et M. ROUX.

1. *Constitution d'un dépôt d'étalons au Bureau international des Poids et Mesures.* — Au début de 1933, le Bureau international présentait au Comité consultatif le résultat des premières comparaisons de groupes étalons déjà transmis au Pavillon de Breteuil par les quatre laboratoires suivants :

- Le National Bureau of Standards des États-Unis (N. B. S.);
- Le National Physical Laboratory de Grande-Bretagne (N. P. L.);
- La Physikalisch-Technische Reichsanstalt d'Allemagne (P. T. R.);
- Le Laboratoire électrotechnique de Tokyo, Japon (E. T. L.).

Le compte rendu de ces mesures, publié au Tome XVI des *Procès-Verbaux du Comité international* (p. 141) a reproduit avec quelques réserves la valeur relative provisoire des unités de force électromotrice (volts internationaux) conservées par ces institutions.

Depuis lors, trois autres laboratoires nationaux ont fait parvenir des éléments Weston leur appartenant :

- L'Institut de Métrologie et de Standardisation de l'U. R. S. S. (I. M. S.);
- Le Laboratoire Central d'Électricité de France (L. C. E.);
- Le Bureau National des Mesures de Pologne (B. N. M.).

Le Tableau I donne le détail de ces groupes.

TABLEAU I.
Groupes déposés au Bureau international des Poids et Mesures.

Symbole du groupe.	Laboratoire propriétaire.	Numéros des éléments constituant chaque groupe.						Valeur moyenne certifiée par le Laboratoire propriétaire.	Date du dépôt au B. I. P. M.
		315	317	3128	3131	3132			
R	P. T. R.	315	317	3128	3131	3132	1,018356 V _A	4 juillet 32	
S	N. B. S.	719	720	730	732		1,018295 V _E	7 juillet 32	
S ₁	id.	720	720	732	732	826	1,018279 V _E	3 août 34	
N	N. P. L.	3210	3211	3212	3213	3214	1,018230 V _G	21 mai 32	
E	E. T. L.	315	336	337	388	391	1,018305 V _J	30 juin 32	
M	I. M. S.	807	810	812	820	822	1,018233 V _G	29 sept. 33	
M'	id.	1145	1146	1148	1420	823	1,018253 V _U	29 sept. 33	
C	L. C. E.	315	316	318	341	342	1,018332 V _F	21 avril 34	
V	B. N. M.	206	207	208			1,018260	19 nov. 33	
I ₁	B. I. P. M.	2900	2901	2902	2903	2904			
I _A	id.	2985	2986	2987	2988	2989			
I _B	id.	2970	2971	2972	2974	2975			
I _C	id.	2913	2914	2915	2916	2917			
I _D	id.	2960	2961	2962	2963	2964			

A l'exception des trois éléments du B. N. M. qui sont venus de Pologne par la valise diplomatique, tous les groupes déposés ont été transportés à la main jusqu'au Bureau international.

2. Réajustement de la valeur des groupes de dépôt : rôle des groupes voyageurs. — Les groupes de dépôt subissent une évolution qui affecte la grandeur de leur force électromotrice. Au bout de peu de temps, leurs valeurs originales certifiées par les Laboratoires nationaux ne sont plus utilisables pour faire des comparaisons satisfaisantes d'unités.

On n'a pas pu songer à réexpédier périodiquement les groupes déposés : il aurait fallu un très grand nombre de messagers pour les transports à la main, et malgré la bonne volonté générale, il aurait été fort difficile d'assurer le retour simultané des groupes au Bureau international, condition nécessaire pour toute comparaison systématique.

On a donc cherché à réajuster périodiquement la valeur des groupes nationaux remis à la garde du Bureau sans que ceux-ci aient à subir les aléas des transports. On y est parvenu grâce à la collaboration des Laboratoires qui ont consenti à détacher des groupes voyageurs, c'est-à-dire un petit nombre d'éléments comparés aux groupes étalons de ces Institutions nationales avant leur expédition et aussitôt après leur retour de Sèvres.

Les groupes voyageurs, pendant leur bref séjour au Bureau international, ont été régulièrement comparés aux groupes de dépôt correspondants.

Chaque fois qu'il en a eu la possibilité, le Bureau international a pris l'initiative d'échanges par un processus inverse du précédent. Un groupe d'éléments lui appartenant (groupe I_C ou I_D) était transporté à un Laboratoire national (N. P. L. ou L. C. E.), où il était déterminé en unités nationales; dès le retour du groupe à Sèvres, cette détermination était utilisée pour attribuer au groupe de dépôt du Laboratoire visité une nouvelle valeur.

Le Tableau II résume la circulation des groupes en 1934-1935; tous les groupes déposés ont été systématiquement comparés au voisinage du 10 décembre 1934 (voir § 5), ce qui confère à cette date une importance particulière. L'évaluation du groupe C est donc chronologiquement la mieux placée. La valeur du groupe N ayant été deux fois réajustée, on peut interpoler pour la date exacte du 10 décembre. D'une façon générale, le réajustement des valeurs des groupes déposés par les Laboratoires a été effectué à des époques diverses s'échelonnant entre septembre 1934 et mars 1935.

TABLEAU II.

Réajustement de la valeur des groupes de dépôt aux environs du 10 décembre 1934, au moyen des groupes voyageurs.

$R = R_0 + 78^{\mu V}$	$R_0 = (1,018309) V_A$ [septembre 1934]
	$R = 1,018394 V_A$ [octobre 1934]
	$R_0 = (1,018323) V_A$ [décembre 1934]
$M' = M'_0 - 41^{\mu V}$	$M'_0 = (1,018294) V_U$ [4 août 1934]
	$M' = 1,018256 V_U$ [décembre 1934]
	$M'_0 = (1,018299) V_U$ [1 ^{er} juin 1935]
$N = N_0 - 0^{\mu V}$	$N_0 = (1,018223) V_G$ [9 octobre 1934]
	$N = 1,018228 V_G$ [24 octobre 1934]
	$N_0 = (1,018233) V_G$ [13 décembre 1934]
$N = I_D - 6^{\mu V}$ $I_D = (1,018232) V_G, N = 1,018226 V_G$	[15 avril 1935]
	[25 avril 1935]
	[9 mai 1935]
$S = s - 4^{\mu V}$ $S_1 = s - 1^{\mu V}$	$s = (1,018278) V_E$ [juin 1934]
	$S = 1,018276 V_E$ } [9 septembre 1934]
	$S_1 = 1,018279 V_E$ }
$E = E_0 + 11^{\mu V}$	$s = (1,018281) V_E$ [novembre 1934]
	$E_0 = (1,018283) V_J$ [8 novembre 1934]
	$E = 1,018298 V_J$ [5 mars 1935]
$C = I_C + 19^{\mu V}$	$E_0 = (1,018292) V_J$ [1 ^{er} septembre 1935]
	$I_C = (1,018322) V_F$ [13 novembre 1934]
	$C = 1,018342 V_F$ [11 décembre 1934]
	$I_C = (1,018323) V_F$ [31 mars 1935]

(Un groupe voyageur est généralement désigné par la même lettre que le groupe de dépôt correspondant, affectée de l'indice ν . Les groupes I_C et I_D appartiennent au Bureau international, et ont été transportés par ses soins.)

Les chiffres portés entre parenthèses sont extraits des certificats des Laboratoires nationaux. Les chiffres en caractères gras sont les valeurs réajustées des groupes de dépôt.

La sécurité avec laquelle on peut faire un tel réajustement dépend naturellement de la variation du groupe voyageur

constatée entre l'aller et le retour et, par suite, dans une large mesure, des précautions prises pour les transports d'éléments si délicats.

Dans le Tableau II, on relève des variations de force électromotrice qui atteignent 10 et même $14^{\mu V}$, entre l'aller et le retour. On a admis que les voyages aller et retour avaient provoqué des perturbations égales : les valeurs réajustées sont donc déduites de simples moyennes arithmétiques. On n'a adopté une hypothèse aussi simpliste qu'en raison de l'ignorance où l'on se trouvait des circonstances détaillées des transports ; les lois de variation des éléments Weston sont par ailleurs trop mal connues pour qu'une interprétation soit possible.

3. *Transports des groupes voyageurs.* — Tous les transports de groupes voyageurs entre le B. I. P. M., d'une part, et le N. P. L., le L. C. E., le N. B. S., d'autre part, ont été faits à la main par des messagers avertis. Le groupe voyageur de l'I. M. S., apporté au Pavillon de Breteuil par messenger, a été retourné en U. R. S. S. par la valise diplomatique. Les groupes de la P. T. R. et de P. E. T. L. ont voyagé à l'aller et au retour par la valise diplomatique ; les coffrets contenant les éléments Weston de ces deux derniers laboratoires étaient suspendus à la cardan à l'intérieur de leur caisse d'emballage.

4. *Méthodes potentiométriques utilisées au Bureau international pour les comparaisons.* — Le compte rendu des premières comparaisons, faites au Bureau autour du 17 janvier 1933, décrivait le potentiomètre de laboratoire utilisé à cette époque (1).

A partir des premiers mois de 1933, l'installation du début a été remplacée par un appareil spécialement construit par l'Association des Ouvriers en Instruments de Précision, sur un plan élaboré en commun avec le Bureau international. Cet appareil est adapté à la mesure des faibles forces électromotrices que présentent deux éléments Weston mis en opposition. Le dispositif de réglage préliminaire du courant principal est séparé du circuit de la mesure.

On élimine de la majeure partie du circuit de mesure (galva-

(1) *Premiers essais de comparaison des étalons nationaux de force électromotrice faits au Bureau international des Poids et Mesures (Procès-Verbaux du Comité international, t. XVI, p. 141).*

nomètre Zernicke Ze et son shunt, boîte à manettes et contacts frottants sur plots) l'influence des forces thermoélectriques parasites, grâce à un double inverseur Otto Wolff, dont les contacts tournants se trouvent à l'intérieur d'un récipient en laiton rempli d'huile de paraffine.

La force électromotrice à mesurer est « compensée » à $10\mu\text{V}$ près par le circuit principal alimenté par une pile sèche. Au cours des deuxième et troisième comparaisons d'ensemble rapportées plus loin, la valeur exacte des forces électromotrices était encore calculée jusqu'au dixième de microvolt par interpolation entre les deux déviations du spot qui correspondaient à deux plots successifs de la décade des dizaines de microvolts. Par la suite, on a utilisé un dispositif qui introduit dans le circuit des mesures l'appoint de force électromotrice nécessaire pour annuler dans tous les cas la déviation du galvanomètre : c'est une lame de manganine de $0,01\Omega$, aux bornes de laquelle on peut créer une force électromotrice comprise entre 0 et 12 microvolts, grâce à une dérivation contenant un accumulateur, un rhéostat à réglage continu et un milliampèremètre; les microvolts et dixièmes de microvolt sont lus directement sur le milliampèremètre.

Les éléments à comparer sont tous placés dans la même cuve remplie d'huile de paraffine. Une petite turbine entraînée par moteur permet d'imprimer, à l'huile du bain, un mouvement lent de circulation. L'agitation commencée une demi-heure avant chaque série de mesures, est interrompue pendant toute leur durée.

Des thermomètres à mercure à double graduation sont disposés dans la cuve. Les températures lues pendant les mesures ne sont notées qu'à titre de contrôle et ne servent nullement à appliquer des corrections : tous les éléments Weston comparés sont à une température voisine de 20° , et dans ces conditions, on n'a pas encore pu déceler le moindre écart entre les coefficients de température d'éléments Weston de provenances diverses (1).

(1) Lors de la visite de M. le Professeur Krukowski, de Lwow, en juin 1933, on a dû exceptionnellement appliquer une correction de température à la mesure des éléments que transportait ce physicien : les étuis de voyage contenant les éléments P. 201 et P. 204 ne permettaient pas de les immerger dans le bain d'huile contenant les groupes étalons. Les réductions correspondant aux écarts de tempé-

Depuis la publication d'une étude faite au Bureau of Standards (1), l'attention a été attirée sur les effets produits par une différence de température entre les deux branches d'une pile non saturée et sur la subsistance de ces effets longtemps après que le gradient a disparu de l'élément. Dans le cas de l'élément Weston saturé, on a reconnu qu'une inégalité de température entre les électrodes modifie la force électromotrice de plusieurs centaines de microvolts par degré.

Aussi est-ce à de très minimes hétérogénéités de température présentes ou récemment disparues à l'instant des mesures qu'il y aurait peut-être lieu d'attribuer la plus grande part des erreurs résiduelles qui ressortent de la compensation des séries : certaines approchent $2\mu\text{V}$.

La comparaison de deux groupes d'éléments s'effectue en opposant chaque élément pris alternativement dans l'un ou l'autre des groupes à une même tare formée par 5 éléments de force électromotrice bien égale connectés en parallèle. Une tare de ce genre a une résistance minime et paraît plus constante qu'un élément unique pendant toute la durée d'une série. Dans chaque série, toutes les mesures sont répétées deux fois (aller et retour) d'une façon symétrique dans le temps.

3. *Comparaisons d'ensemble des groupes de dépôt.* — Au cours des années 1933 et 1934, pendant que les installations du Bureau subissaient les transformations énumérées ci-dessus, les groupes de dépôt ont été soumis à des comparaisons systématiques autour des dates suivantes : 17 janvier 1933, 3 septembre 1933, 8 février 1934 et 10 décembre 1934.

Les résultats portés au Tableau III permettent de suivre l'évolution relative des groupes pendant ces deux années : dans chaque cas, les groupes déposés ont été comparés deux fois dans toutes les combinaisons possibles, suivant une chronologie symétrique. Une double compensation très complète a pu ainsi être opérée pour éliminer des résultats la variation relative des groupes pendant la durée nécessaire aux mesures (environ un mois) et pour atténuer les erreurs accidentelles.

rature mesurés ont été calculées par la formule de M. Vigoureux (*Proc. Phys. Soc.*, vol. XLV, p. 172).

(1) J. H. PARK, *Effect of Service temperature conditions on the electromotive force of unsaturated portable standard cells.* (*N. B. S. Journal of Research*, vol. 10, p. 89).

TABLEAU III.

Comparaisons d'ensemble des groupes de dépôt effectuées en 1933 et 1934.

17 janvier 1933.		3 septembre 1933.		8 février 1934.		10 décembre 1934.	
$\Delta_1 = \frac{1}{6}(R+N+S+E)$		$\Delta_2 = \frac{1}{3}(R+N+S+E)$		$\Delta_3 = \frac{1}{6}(R+N+S+E+M)$		$\Delta_4 = \frac{1}{6}(R+N+S+E+M'+E)$	
Groupe.	Valeur.	Groupe.	Valeur.	Groupe.	Valeur.	Groupe.	Valeur.
	$R = \Delta_1 + 68$		$R = \Delta_2 + 75$		$R = \Delta_3 + 94$		$R = \Delta_4 + 103$
	$N = \Delta_1 - 57$		$N = \Delta_2 - 58$		$N = \Delta_3 - 51$		$N = \Delta_4 - 54$
	$S = \Delta_1 - 20$		$S = \Delta_2 - 26$		$S = \Delta_3 - 21$		$S = \Delta_4 - 20$
	$E = \Delta_1 + 10$		$E = \Delta_2 + 9$		$E = \Delta_3 + 14$		$E = \Delta_4 + 10$
					$M = \Delta_3 - 36$		$M' = \Delta_4 - 17$
					$M' = \Delta_3 - 7$		$C = \Delta_4 - 22$
					$I_1 = \Delta_3 - 39$		$I_1 = \Delta_4 - 42$
					$V = \Delta_3 - 27$		$V = \Delta_4 - 24$
							$M = \Delta_4 - 126$

6. — Valeurs des unités nationales en décembre 1934. — Le rapprochement du Tableau II et de la dernière colonne du Tableau IV qui concerne les comparaisons d'ensemble faites autour du 10 décembre 1934, permet d'extraire les valeurs relatives des diverses unités nationales du volt.

En exprimant ces valeurs en fonction d'une même unité

$$V_m^6 = \frac{1}{6} (V_A + V_E + V_F + V_G + V_J + V_U),$$

moyenne des unités du volt, telles qu'elles sont conservées par les étalons de six Laboratoires nationaux, on peut dresser le tableau suivant :

TABLEAU IV.

Valeurs des unités nationales en décembre 1934.

Allemagne (P. T. R.).....	$V_A = 1,000008 V_m^6$
États-Unis (N. B. S.).....	$V_E = 1,000000$
France (L. C. E.).....	$V_F = 0,999937$
Grande-Bretagne (N. P. L.).....	$V_G = 1,000018$
Japon (E. T. L.).....	$V_J = 1,000011$
U. R. S. S. (I. M. S.).....	$V_U = 1,000026$

$$\Delta_4 = 1,018299 V_m^6.$$

Plusieurs sources d'incertitude affectent les résultats précédents. Dans les valeurs réajustées des groupes de dépôt, les erreurs des mesures faites tant au Bureau international des Poids et Mesures, que dans les Laboratoires nationaux se sont d'abord accumulées. A propos des comparaisons d'ensemble faites au Bureau international, on a déjà signalé au paragraphe 4 que certaines erreurs résiduelles résultant des calculs de compensation sur un grand nombre de séries, avaient pu être de l'ordre de 2 μV . Quelle que soit leur origine, ces résidus donnent déjà une limite à la précision des mesures.

Mais les sources d'erreurs d'ordre métrologique sont petites devant l'infidélité propre des éléments Weston au cours du temps et au cours des transports nécessaires pour confronter les unités nationales.

C'est ainsi que certains éléments voyageurs ont varié de 4 μV entre l'aller et le retour. On ne doit pas espérer avoir éliminé

l'effet de pareilles variations par le simple calcul de moyennes arithmétiques qu'on s'est borné à faire. Enfin, les valeurs des groupes déposés ont été réajustées à des dates diverses qui ne coïncident pas toutes avec les comparaisons d'ensemble de décembre 1934.

Dans ces conditions, on ne croit pas pouvoir avancer les chiffres ci-dessus avec une sécurité meilleure que 5 millièmes environ.

Additif.

Selon la Résolution 4 du Comité consultatif, les résultats des comparaisons précédentes peuvent être exprimés en fonction de l'unité moyenne préconisée par ce Comité :

$$V_M = \frac{1}{5} (V_A + V_E + V_G + V_J + V_U).$$

La transformation conduit au tableau suivant :

TABLEAU V.

Valeurs des unités nationales en décembre 1934 ⁽¹⁾.

Allemagne (P. T. R.).....	V_A	$= V_M - 4$	^{μV}
États-Unis (N. B. S.).....	V_E	$= V_M - 12$	
Grande-Bretagne (N. P. L.).....	V_G	$= V_M + 5$	
Japon (E. T. L.).....	V_J	$= V_M - 2$	
U. R. S. S. (I. M. S.).....	V_U	$= V_M + 13$	
France (L. C. E.).....	} V_F	$= V_M - 76$	
		V_F nouveau	$= V_M$

(¹) Les chiffres ci-dessus sont liés aux valeurs produites au tableau IV. Les écarts apparents d'un microvolt entre les deux tableaux proviennent du fait que les résultats, calculés avec une décimale supplémentaire, ont été indépendamment arrondis au microvolt pour leur présentation finale en tableaux.

ANNEXE E 11.

MÉMOIRE PRÉLIMINAIRE

SUR

L'ADOPTION DE LA QUATRIÈME UNITÉ

DANS LE SYSTÈME M. K. S. (GIORGI);

Par M. L. LOMBARDI.

Résumé historique.

Le Comité consultatif d'Électricité a été créé, sur une proposition adoptée par le Comité international des Poids et Mesures le 4 octobre 1927 et ratifiée par la Septième Conférence, pour conseiller le Comité international sur les questions relatives aux systèmes de mesure et aux étalons électriques. Il a donc, dès sa constitution, été saisi de la question des unités électriques. Dans sa première réunion du mois de novembre 1928, considérant la grande importance qu'il y a à unifier les systèmes de mesure électriques sur une base dépourvue de tout caractère arbitraire, le Comité consultatif a reconnu que le système absolu, dérivé du système C. G. S., pourra être avec avantage substitué au système des unités internationales pour toutes les déterminations scientifiques et industrielles, et a décidé d'en proposer l'adoption au Comité international des Poids et Mesures.

Cependant, tout en reconnaissant les grands progrès déjà accomplis dans le domaine des mesures électriques de haute précision, il n'a pas cru qu'il fût possible à cette époque de fixer avec toute l'exactitude nécessaire, et dont ils sont susceptibles, les rapports qui existent entre les unités absolues dérivées du

système C. G. S. et les unités internationales de courant, de force électromotrice et de résistance, telles qu'elles ont été définies par le Congrès international de Chicago en 1893 et la Conférence de Londres en 1908, et il a émis le vœu que les recherches dans ce but fussent poursuivies dans les laboratoires convenablement outillés, suivant un programme préalablement étudié en accord avec lui-même.

A la deuxième session de 1930 des rapports très importants sur cette question ont été présentés par le Bureau of Standards de Washington, par le National Physical Laboratory de Teddington, par la Chambre centrale des Poids et Mesures de Léninegrad et par le Laboratoire électrotechnique de Tokyo.

On put constater à cette occasion que les méthodes de détermination de l'ohm absolu étaient suffisamment avancées et que la concordance entre les déterminations des bobinés (étalons secondaires) des différents laboratoires restait dans les limites de précision des expériences, tandis que les comparaisons internationales des éléments montraient encore des différences dépassant les limites de la précision possible entre les valeurs de la force électromotrice des étalons des différents pays. On reconnut donc la nécessité de refaire les déterminations de la force électromotrice des éléments Weston internationaux dans chaque laboratoire national, par la méthode du voltamètre à argent.

A la session de 1933, en considération des résultats très concordants obtenus dans les mesures de certains laboratoires, le Bureau of Standards et le National Physical Laboratory firent la proposition que le Comité consultatif fixât immédiatement le rapport entre les unités internationales et les unités absolues, dans le but de pouvoir en obtenir l'approbation par le Comité international et la sanction de la Conférence générale au cours de la même année, et de pouvoir fixer dès lors une date rapprochée pour la substitution du Système absolu au Système international. Mais, les mesures de l'ohm et de l'ampère absolus n'ayant pas encore été achevées dans les autres laboratoires qui les avaient entreprises, on ne crut pas prudent d'accepter la date proposée; l'on reporta à l'année 1935 la fixation des valeurs, et à l'année 1937 l'introduction des nouvelles unités, en exprimant le vœu qu'à cette date le Comité international des Poids et Mesures ait obtenu les pouvoirs nécessaires pour fixer, sans attendre une autre Conférence, les rapports susdits, ainsi que la date d'adoption des nouvelles unités. La tâche d'effectuer la comparaison

définitive des résistances et des éléments étalons avec toute la précision nécessaire, et d'en fixer les valeurs en fonction des unités absolues, fut confiée à un Sous-Comité technique, composé des membres représentant les laboratoires nationaux, et qui aurait dû se réunir au Bureau international des Poids et Mesures dans le cours de cette année.

Bien que l'état des recherches sur les unités absolues dans plusieurs laboratoires ne fût pas encore assez avancé pour permettre la convocation du Sous-Comité technique dans le délai prévu, une réunion du Comité consultatif a été convoquée pour le mois de septembre prochain, au cours de laquelle on se propose de discuter plusieurs questions ayant trait aux problèmes des unités et des étalons.

La question, qui forme l'objet de ce Mémoire préliminaire, est bien du ressort du Comité consultatif, et lui est proposée par la Commission électrotechnique internationale sur la demande de son Comité d'études pour les grandeurs et unités électriques et magnétiques.

Le système de mesure M. K. S.

A l'occasion de sa réunion plénière à Bellagio, en 1927, la C. E. I. avait confié à une section de son Comité de nomenclature l'examen des questions relatives aux unités magnétiques; la réunion plénière de 1930 à Stockholm avait élargi ce programme, en y comprenant toutes les questions relatives aux grandeurs et unités électriques et magnétiques; l'Assemblée plénière de Scheveningen au mois de juin de cette année a transformé le sous-comité en comité autonome sous la présidence de M. A. E. Kennelly. Conformément aux résultats d'un *referendum* entre les Comités électrotechniques des différentes nations, provoqué à la suite d'une réunion tenue à Paris en 1933 avec intervention du Secrétaire général de l'Union internationale de Physique pure et appliquée, le Comité a adopté une résolution extrêmement importante, ayant pour objet l'extension de la série des unités pratiques actuellement employées en électrotechnique par son incorporation dans un système cohérent, ayant comme unités fondamentales de longueur, masse et temps, le mètre, le kilogramme et la seconde, et comme quatrième unité fondamentale une des unités suivantes : coulomb, ampère, volt, ohm, farad, henry, weber. Ce système, désigné ordinairement par les initiales

des unités fondamentales de longueur, de masse et de temps M. K. S., avait été notamment proposé par M. G. Giorgi, en 1901, pour éliminer les complications inhérentes aux systèmes classiques C. G. S. électrostatique et électromagnétique, et donner au système pratique les caractères d'un système absolu et cohérent, bien approprié à l'évaluation des grandeurs habituelles.

A cette époque la question de la quatrième unité n'avait pas fait l'objet de discussions approfondies, bien que sa nécessité ne pût être méconnue; elle était implicitement mise à la base des systèmes absolus C. G. S. par l'attribution de la valeur unité à la perméabilité magnétique ou à la constante diélectrique de l'espace vide.

Lorsque le mouvement en faveur du système M. K. S. s'est développé, surtout par l'action de M. Giorgi en Italie et de MM. Campbell et Kennelly en Amérique, tous les trois se sont formellement déclarés favorables au choix de l'ohm comme quatrième unité, et MM. Campbell et Giorgi firent nettement la proposition d'adopter comme étalon l'ohm international, en considération des nombreux étalons existant dans les laboratoires, et des rapports établis entre les unités internationales, très répandues dans l'usage courant.

Une telle suggestion était, en fait, contradictoire avec le principe affirmé par le Comité consultatif d'Électricité dès sa première réunion; pour cette raison elle rencontra plusieurs oppositions dans la Commission électrotechnique. La Section B du Comité de nomenclature en 1933 proposa en effet aux Comités nationaux, à l'occasion du *referendum* déjà rappelé, de donner leur avis sur le choix de la quatrième unité entre l'unité de résistance, définie comme étant 10^9 fois l'unité électromagnétique C. G. S., et la valeur correspondante de la perméabilité de l'espace vide.

Cette dernière alternative n'a plus été envisagée au cours de la réunion de Scheveningen, à cause du caractère tout à fait abstrait de cette grandeur, dont on ne pourrait songer à créer des étalons matériels.

C'est pourquoi le Comité présidé par M. Kennelly propose maintenant à l'examen du Comité consultatif les sept unités ci-dessus énumérées, avec prière d'exprimer son avis sur le choix le plus convenable de la quatrième unité du système M. K. S. La même question a été posée par M. Kennelly devant le Comité des symboles et unités constitué par l'Union internationale de Physique pure et appliquée, avec lequel le Comité de nomencla-

ture de la C. E. I. a établi depuis plusieurs années une collaboration très cordiale.

Les considérations les plus importantes, qui peuvent influencer sur le choix, concernent d'un côté la possibilité de créer et de conserver des étalons de cette unité, par analogie à ceux des unités de longueur et de masse, déjà existants au Bureau international des Poids et Mesures. A cet égard, il n'y a pas de doute que l'unité de résistance soit la mieux appropriée, les étalons secondaires se réduisant à des bobines, dont la construction et le transport n'offrent aucune difficulté grave, et dont la comparaison peut s'effectuer avec la plus grande simplicité et exactitude; leur variabilité dans le temps paraît pouvoir être presque entièrement supprimée par l'emploi des nouveaux alliages, expérimentés au Bureau of Standards. Que la grandeur de l'étalon primaire puisse à l'origine être convenablement rapportée, moyennant des mesures absolues, au multiple 10^9 de l'unité absolue C. G. S., c'est là une question hors de doute d'après les résultats des dernières expériences, et ce point a une importance capitale à la suite du vœu déjà émis par le Comité consultatif et ratifié par la Conférence générale.

D'un autre côté, il est bien sûr que certaines autres unités jouissent d'avantages comparables à ceux de l'unité de résistance pour ce qui concerne la simplicité de construction et la reproductibilité des étalons, telle l'unité d'inductance. A un point de vue tout à fait différent, on pourrait d'ailleurs envisager le problème ayant égard aux relations qui existent entre les différentes grandeurs physiques, et d'après lesquelles chacune d'elles est reliée aux unités qu'on choisit comme fondamentales. Cette question n'a pas une grande importance pour les électriciens qui, après l'adoption du système M. K. S. ayant par lui-même les caractères d'un système absolu et cohérent, n'auront que très rarement besoin de recourir aux équations dimensionnelles; M. Giorgi, dans un memorandum sur le système M. K. S., publié par le bureau central de la C. E. I., a bien montré que le problème peut être simplifié pratiquement, en introduisant simultanément dans les équations deux unités électriques, par exemple le volt et l'ampère, dont le produit a les dimensions de l'unité de puissance mécanique, au lieu de se servir uniquement de l'une ou de l'autre comme quatrième unité fondamentale.

Dans le même memorandum M. Giorgi a encore insisté sur les inconvénients que pourrait entraîner le choix de l'ohm absolu

comme quatrième unité du système pratique M. K. S., à savoir : nécessité de retoucher tous les étalons des unités électriques internationales; dépendance des nouveaux étalons à l'égard des mesures absolues, dont la précision est inférieure à celle qu'on peut obtenir en comparant entre eux des étalons matériels; dépendance des unités rapportées au système C. G. S. à l'égard des propriétés physiques du vide, qui, d'après les données actuelles de la science, peuvent subir des modifications dans l'espace et dans le temps. D'ailleurs, lorsque les résultats des mesures auront atteint une exactitude et une concordance suffisantes pour permettre d'approcher l'unité absolue à moins de quelques millionièmes, et d'introduire le système absolu au lieu du système international, rien n'empêchera de construire avec la même approximation et concordance les étalons secondaires, rapportés à un étalon primaire que l'on pourra fixer d'une façon invariable par une convention internationale, et déposer au Bureau des Poids et Mesures à côté du Mètre et du Kilogramme étalons.

Cependant la question est ouverte devant le Comité consultatif, dont l'avis, comme celui de l'Union internationale de Physique, ayant la plus grande importance pour les décisions de la Commission électrotechnique internationale, pourra être exprimé avec la plus grande liberté, et recevra la plus sérieuse considération.

Rome, le 15 juillet 1935.

ANNEXE E42.

MÉMOIRE

SUR

LE SYSTÈME DES UNITÉS M. K. S.

Par Sir RICHARD GLAZEBROOK, K. C. V. O., K. C. B., F. R. S.,

Président de la Commission des Symboles,
Unités et Nomenclature (S. U. N.)
de l'Union internationale de Physique pure et appliquée.

(COMMUNIQUÉ A LA COMMISSION S. U. N.

EN AOÛT 1935.)

Note. — Dans tout ce Mémoire les termes ampère, volt et ohm désignent les unités pratiques du système absolu C. G. S. Ainsi :

1 ampère ⁽¹⁾ = 10^{-1} unité C. G. S. d'intensité;
1 volt = 10^8 unités C. G. S. de force électromotrice;
1 ohm = 10^9 unités C. G. S. de résistance.

Ces unités diffèrent en tout cas légèrement du système d'unités international, défini par la Conférence de Londres en 1908.

I. — Mémoire présenté par le Président de la Commission S. U. N. au sujet de la requête émanant de la Commission électrotechnique internationale (C. E. I.).

Dans le Rapport de la Commission S. U. N. adopté par l'Assemblée générale de l'Union de Physique pure et appliquée, réunie

(¹) EVERETT, *Units and Physical Constants*, 1879.

à Londres le 5 octobre 1934, on trouve à la page 6 un compte rendu de l'Assemblée du Comité des Grandeurs électriques et magnétiques et des Unités (E. M. U.) de la Commission électrotechnique internationale, tenue à Paris en octobre 1933. Dans ce compte rendu, on se réfère aux propositions du Professeur Giorgi. Voici une citation de ce Rapport :

III. — *Les propositions du Professeur Giorgi.*

« Une discussion complète eut aussi lieu au sujet des propositions du Professeur Giorgi concernant le système d'unités M. K. S. et l'on fut d'accord pour inviter les Comités nationaux ⁽¹⁾ de la C. E. I. à donner leur opinion sur l'extension des séries des unités pratiques par leur incorporation dans un système cohérent, ayant comme unités fondamentales de longueur, de masse et de temps, le mètre, le kilogramme et la seconde, et comme quatrième unité fondamentale, soit celle de la résistance définie comme le multiple exact 10^9 de l'unité électromagnétique C. G. S., ou la valeur correspondante de la perméabilité du vide. »

La question de l'adoption du système M. K. S. est venue devant le Comité E. M. U. à Scheveningen le 21 juin 1935, et le résultat auquel on est arrivé a été confirmé par une assemblée plénière de la C. E. I. à Bruxelles.

Le résultat est donné dans une lettre jointe à ce Mémoire et émanant du Dr Kennelly, président des réunions à Scheveningen et adressée au Professeur Abraham, secrétaire de l'Union internationale de Physique pure et appliquée, tandis qu'on trouvera un compte rendu plus détaillé des faits dans une lettre du Professeur Marchant, l'un des délégués britanniques aux réunions de la C. E. I. Les résultats de la lettre du Dr Kennelly peuvent être ainsi résumés.

La C. E. I. adopta sans opposition le système d'unités Giorgi

(1) Le Comité national britannique de la C. E. I., réuni le 5 juin 1935, a constaté que le Comité national britannique de la Commission électrotechnique internationale ne soulève aucune objection à l'usage du mètre et du kilogramme dans la définition des quantités électriques, pourvu que la quatrième unité, qui est nécessaire pour la définition de ces quantités, conduise à un résultat en accord avec le système C. G. S. Il est reconnu que la C. E. I. est uniquement dans la position de faire des recommandations au Comité international des Poids et Mesures concernant la valeur de la quatrième unité.

basé sur le mètre, le kilogramme et la seconde. La C. E. I. n'arriva pas à une décision en ce qui concerne la quatrième unité nécessaire pour compléter le système pour les besoins de l'électricité, mais décida que le choix ne serait pas fait avant d'avoir consulté la Commission S. U. N. de l'Union internationale de Physique et le Comité consultatif d'Électricité du Comité international des Poids et Mesures. Or, suivant la lettre du Professeur Marchant, tout le monde a admis, à Bruxelles, quoique aucun texte formel n'eût été rédigé, que la quatrième unité à adopter (soit une unité de quantité d'électricité, soit une unité de résistance) devrait être en accord avec le système C. G. S.; et l'on demanderait aux Comités qui seraient consultés de donner à cette quatrième unité une valeur en accord avec le fait que la perméabilité du vide est égale à l'unité.

Les questions sur lesquelles on demande alors à la Commission S. U. N. de se prononcer sont :

En supposant que le système M. K. S. soit généralement adopté, quelle doit être la quatrième unité indépendante? Sera-t-elle, conformément au désir du Comité national britannique de la C. E. I. et l'opinion générale de la récente réunion de Bruxelles, ainsi que l'indique le Professeur Marchant, une grandeur en accord avec l'hypothèse faite dans le système C. G. S. que la perméabilité du vide est égale à l'unité? Ou sera-t-elle, ainsi que le Professeur Giorgi le suggère dans ses publications, l'une des unités internationales actuelles, de préférence l'ohm international; et, dans l'un ou l'autre des cas, laquelle des unités possibles sera adoptée comme fondamentale?

Avant de poursuivre la discussion, il est nécessaire de montrer clairement quelle est la situation à l'heure actuelle.

LA SITUATION ACTUELLE DES UNITÉS ÉLECTRIQUES.

La situation actuelle des unités électriques est la suivante :

Le traité international, connu sous le nom de la Convention du Mètre 1875, créa un Bureau international des Poids et Mesures qui devait travailler « sous la direction et surveillance exclusives » d'un Comité international des Poids et Mesures qui lui-même est subordonné à l'autorité d'une Conférence générale des Poids et Mesures, composée de délégués de tous les États

adhérents à la Convention. Il y a actuellement 32 de ces États; les Conférences sont convoquées tous les six ans.

Le Comité international se compose de 18 membres élus par la Conférence, et qui restent en exercice jusqu'à la Conférence suivante. A l'origine, la Conférence s'occupait uniquement des étalons de masse et de longueur, du volume aussi et quelque peu de la température. La Sixième Conférence de 1921 vota à l'unanimité un amendement à la Convention de 1875; d'après lequel, s'il était mis en vigueur, la Conférence se chargerait des étalons électriques. Ceci fut approuvé par tous les Gouvernements, et fut mis en vigueur à la Septième Conférence de 1927, lorsqu'un Comité consultatif d'Électricité fut créé pour conseiller le Comité international des Poids et Mesures dans les questions concernant les systèmes de mesure et les étalons électriques. La constitution de ce Comité a été réglée par cette Septième Conférence et les pouvoirs nécessaires ont été donnés au Comité international pour mettre en vigueur l'article 7 de cette Convention, après avoir pris en considération le rapport du Comité consultatif d'Électricité.

Agissant d'après les recommandations du Comité consultatif et du Comité international des Poids et Mesures, la Huitième Conférence, réunie en 1935, alla plus loin, en votant la résolution suivante :

« La Conférence sanctionne le principe de la substitution du Système absolu des unités électriques au Système international. En considérant d'autre part qu'un certain nombre de laboratoires nationaux n'ont pas encore terminé les mesures nécessaires pour relier les unités internationales aux unités absolues, elle décide de reculer jusqu'à l'année 1935 la fixation provisoire du rapport entre chaque unité internationale et l'unité absolue correspondante.

» Elle donne, dans ce but, au Comité international les pouvoirs nécessaires pour fixer, alors et sans attendre une autre Conférence, ces rapports, ainsi que la date d'adoption des nouvelles unités. »

On voit ainsi que les pouvoirs du Comité consultatif sont purement consultatifs, et ceux du Comité international purement exécutifs. L'autorité suprême appartient à la Conférence générale qui, d'après la Convention, est l'organisme dirigeant. Les pouvoirs délégués au Comité international sont strictement limités à l'action exécutive des détails techniques. La situation actuelle est donc telle que la Conférence générale, qui est l'organisme dirigeant dans les questions internationales relatives aux

étalons de mesure, a sanctionné le principe de la substitution du système absolu d'unités électriques au système international, en laissant au Comité international des Poids et Mesures, après avoir pris l'avis du Comité consultatif d'Électricité, le soin de fixer les valeurs numériques qui doivent être attribuées à certains rapports, et la date à laquelle le système absolu serait mis en vigueur.

Les prochaines réunions du Comité consultatif et du Comité international des Poids et Mesures sont fixées pour septembre et octobre de l'année courante, 1935. A ces réunions, le choix de la quatrième unité sera pris en considération. En supposant qu'on ne doive pas faire de brèche au système C. G. S., la nouvelle unité pourrait être :

[1] L'Ampère, 10^{-1} unité d'intensité C. G. S. (1 unité M. K. S.);
ou peut-être, de préférence,

[2] La Quantité d'électricité transportée en 1 seconde par un courant d'intensité 10^{-1} unité C. G. S.;

ou

[3] Le Volt, 10^8 unités C. G. S. de force électromotrice
(1 unité M. K. S.);

ou encore

[4] L'Ohm, 10^9 unités C. G. S. de résistance (1 unité M. K. S.).

Parmi ces unités, la résistance, étant le quotient de deux des précédentes, apparaîtrait comme impropre dans ce choix de l'unité fondamentale. L'ampère peut être déterminé avec une haute précision, au moyen de diverses balances de courant qui existent actuellement, et une quantité d'électricité paraît être une entité fondamentale. Parmi les quatre possibilités signalées, la quantité d'électricité semblerait être la mieux appropriée au but. Mais il faut se rappeler que la totalité du système C. G. S. est basée sur l'hypothèse (*assumption*) que la perméabilité du vide dans ce système est l'unité.

Ceci est à la base des définitions de l'ampère, de l'ohm et du volt, et l'hypothèse la plus fondamentale qui puisse être faite pour le système M. K. S. serait que la valeur choisie pour la perméabilité du vide soit celle qui dériverait de l'hypothèse fondamentale du système C. G. S. que la perméabilité du vide

est égale à l'unité. Ce résultat est assuré si la perméabilité du vide dans le système M. K. S. est fixée ⁽¹⁾ à 10^{-7} . Je voudrais suggérer alors à la Commission S. U. N. que le choix se fasse entre

[1] La perméabilité du vide fixée à 10^{-7} ;

ou

[2] L'unité de quantité d'électricité définie comme la quantité transportée en une seconde, par 10^{-1} unité C. G. S. de courant.

Je serais obligé aux membres de la Commission de vouloir bien me communiquer leurs points de vue aussitôt que possible. En écrivant ceci, je ne désire d'aucune manière limiter le choix à [1] ou [2], mais seulement, étant donné le peu de temps dont on dispose, formuler la solution d'une manière bien définie.

Peut-être comme conclusion de cette partie de la Note, pourrais-je me permettre de dire que ma propre préférence va à [1] ⁽²⁾.

LES UNITÉS ABSOLUES ET LE SYSTÈME INTERNATIONAL.

Dans ce qui précède on a discuté la question dans l'hypothèse où la Commission S. U. N. n'aurait aucun désir d'élaborer un système d'unités pratique, qui soit en désaccord avec les décisions de la Conférence générale. A ce sujet le D^r Abraham écrit :

« Il est donc absolument certain que l'on se trouverait en conflit avec la Conférence des Poids et Mesures si l'on voulait fonder un système d'unités électriques sur la définition par exemple de l'unité de résistance par des étalons soigneusement conservés. »

A ce propos, il peut être utile d'ajouter une remarque sur les unités électriques absolues du système C. G. S. En premier lieu elles sont basées, ainsi que le serait aussi le système M. K. S., sur les unités fondamentales de longueur, de masse et de temps, et pour beaucoup de grandeurs par exemple : la vitesse, le moment, l'énergie, ces unités sont suffisantes, et quand de telles

⁽¹⁾ Si l'on rationalisait le système M. K. S., cette quantité serait $4\pi \times 10^{-7}$.

⁽²⁾ Note ajoutée le 18 octobre 1935. En réponse à cette demande, une très grande majorité des membres de la Commission S. U. N. s'est prononcée en faveur de [1].

quantités sont mesurées en fonction des unités ci-dessus, elles sont dites mesurées de façon absolue. L'unité absolue de vitesse, 1 mètre par seconde, est un étalon idéal réalisé de plus en plus exactement au fur et à mesure qu'augmente la précision de la détermination du centimètre, de la seconde et de leur rapport.

Maintenant nous arrivons aux autres sciences : électricité, magnétisme et électromagnétisme, par exemple. La connaissance d'autres quantités est nécessaire, avant que nous puissions relier les mesures électriques et magnétiques au système absolu.

Actuellement nous savons que les systèmes électriques et magnétiques exercent des forces et sont des sources d'énergie. La force et l'énergie se mesurent en fonction des unités fondamentales de longueur, de masse et de temps. En exprimant les forces électriques et magnétiques, mesurées en fonction de quantités électriques et magnétiques, au moyen de ces unités fondamentales, nous pouvons obtenir un lien entre ces quantités et nos unités; nous avons là un moyen de mesure « absolue » des quantités électriques et magnétiques.

Pour compléter, nous avons besoin de trois autres quantités désignées par A , K_0 et μ_0 . La force entre deux quantités e , e' d'électricité distantes de r centimètres dans le vide est égale à $\frac{ee'}{K_0 r^2}$; celle entre deux pôles magnétiques m , m' est $\frac{mm'}{\mu_0 r^2}$; celle entre un pôle magnétique m et un courant i est $m \cdot i \cdot \sin \theta \frac{ds}{Ar^2}$; dans chaque cas, la force est mesurée en dynes. On peut montrer de plus que $\frac{A}{\sqrt{\mu_0 K_0}}$ est égal à la vitesse avec laquelle les ondes électriques parcourent l'espace, de sorte que nos trois constantes se réduisent à deux.

Dans chacun des systèmes absolus, système électrostatique et système électromagnétique tels que Maxwell les a développés, on donne à A la valeur unité. Ainsi, en désignant par C la vitesse des ondes électriques dans le vide, on a

$$C \sqrt{\mu_0 K_0} = 1.$$

Par ailleurs, Gauss pose $A=C$ et, d'après cette hypothèse, $\sqrt{\mu_0 K_0} = 1$. Cela lui permet de prendre μ_0 et K_0 , tous deux égaux à l'unité. Il faut noter qu'en toute rigueur nous ne pouvons déduire ces deux valeurs de l'équation unique.

Mais nous n'avons pas encore obtenu notre lien entre les

quantités électriques et les unités mécaniques. Nous pourrions bâtir un système cohérent, par exemple en choisissant arbitrairement une certaine quantité de magnétisme comme unité, en fonction de laquelle on mesurerait m et m' , évaluant en dynes la force (soit f) qui s'exerce entre les quantités distantes de r centimètres, et obtenant ainsi μ_0 d'après l'équation $\mu_0 = \frac{mm'}{fr^2}$. L'expérience ainsi conduite serait beaucoup moins simple que celle qui est indiquée.

Mais une autre hypothèse (*assumption*) est possible. Les fondateurs du système absolu, Maxwell, Thomson et leurs associés, n'ont pas choisi comme unité une quantité arbitraire de magnétisme. Ils ont admis, et ceci est également une hypothèse, que la valeur de μ_0 dans le vide est l'unité : c'est la base du système d'unités électromagnétiques actuel. De plus, on peut montrer que la valeur de la perméabilité magnétique, qui est le rapport de l'induction magnétique à la force magnétisante dans le vide, est $\frac{\mu_0}{A}$, et puisque A est l'unité, μ_0 est la perméabilité magnétique du vide. Par suite, si la valeur de μ_0 est également l'unité, nous arrivons à ce résultat que la perméabilité magnétique du vide est l'unité de perméabilité. Toutes les quantités liées entre elles : intensités de courant, forces électromotrices, résistances, sont mesurées en fonction d'un étalon idéal, l'unité absolue C. G. S., dont nous nous approchons toujours davantage au fur et à mesure que nos méthodes de mesure progressent.

Dans la tentative de Maxwell de matérialiser l'ohm en 1863, les erreurs étaient considérables. Elles furent beaucoup plus petites dans les mesures effectuées au Cavendish Laboratory et ailleurs au début des années 80. Sir Frank Smith a réduit les erreurs encore davantage au National Physical Laboratory lorsque, dans les recherches les plus récentes, l'ohm, 10^9 unités C. G. S. de résistance, et l'ampère, 10^{-1} unité C. G. S. de courant ont été réalisés avec une précision de 2 cent-millièmes. Plus nos méthodes de mesure progressent, plus l'on peut s'approcher de ces unités idéales; et l'erreur est actuellement si petite qu'il est difficile de supposer qu'une approximation plus précise encore modifierait, d'une façon importante, les étalons matériels au moyen desquels ces valeurs sont exprimées.

La Commission est priée de donner son conseil au sujet de l'un des liens nécessaires pour réunir les quantités électriques avec le

système M. K. S. d'unités mécaniques. Il est clair que cette liaison peut être faite le plus directement en supposant que la perméabilité de l'espace soit en accord avec la valeur unité, ainsi qu'il est admis dans le système C. G. S. Mais on a fait la suggestion de prendre un étalon matériel, tel que la résistance d'une colonne de mercure ou une bobine de fil soigneusement conservée, et l'on a proposé l'ohm international, c'est-à-dire la résistance d'une colonne de longueur 106,300 centimètres et pesant 14,452 r grammes à la température de 0°. Mais la résistance d'une colonne de mercure contenue dans un tube de verre n'est pas constante. L'expérience a montré que les dimensions d'un tube varient, et cet étalon « absolu » aurait besoin d'être redéterminé de temps en temps par un nouveau remplissage du tube, pesage de son contenu et mesure de sa résistance par rapport à quelque étalon réellement absolu, par exemple 10^9 unités C. G. S., déterminé par exemple au moyen de l'appareil de Lorenz.

L'expérience a montré que la résistance de tubes de mesure change d'environ 25 millièmes. Les bobines de fil varient aussi; on a trouvé que celles qui sont le plus soigneusement surveillées varient d'environ 30 millièmes au cours d'une vingtaine d'années. Il n'est pas possible à présent de construire un étalon matériel permanent, et ce serait une grave erreur de faire reposer le futur système d'unités électriques sur une base variable.

Le Dr Abraham a très bien montré la différence entre les étalons de longueur et de masse et un quelconque étalon matériel électrique; il écrit :

« Il est exact que l'on a remplacé depuis longtemps les toutes premières définitions du mètre et du kilogramme par les définitions actuelles qui sont basées sur l'emploi d'une série d'étalons précieusement conservés. On a raison de le faire, parce que l'expérience a montré que ces étalons ont une conservation parfaite; leurs différences mutuelles restent invariables après des années, et cela avec toute la précision des mesures métrologiques les plus fines.

» Mais il n'en est pas de même en électricité. Bien au contraire, les comparaisons faites entre les étalons conservés dans les divers laboratoires ont prouvé que les étalons ne se conservent pas avec le temps; leurs différences varient de quantités très supérieures aux incertitudes expérimentales; les étalons électriques sont des outils de troisième ordre, tandis que les étalons du mètre et du kilogramme sont des étalons de premier ordre.

» Si donc on veut baser un système des unités sur le mètre, le kilogramme et la seconde et sur une quatrième unité de nature électromagnétique, la seule chose à faire est de prendre l'une quelconque des unités pratiques (ohm, volt, ampère) comme quatrième unité de référence, étant bien entendu que cette unité ne sera pas définie par des étalons, mais qu'elle continuera à être définie comme maintenant, en disant par exemple que l'ohm est par définition le multiple décimal exact (10^9) de l'unité C. G. S. classique de Maxwell. »

Dans la lettre suivante, le D^r Abraham met en avant une résolution en vue de la faire approuver par la Commission :

« Considérant que lors de leur création les unités électromagnétiques du système pratique avaient été définies comme étant des multiples décimaux exacts des unités électromagnétiques C. G. S.,

» Considérant que ces définitions initiales comportent plus de précision expérimentale et plus de sécurité que des définitions basées, soit sur la conservation de certains étalons, soit sur des techniques spéciales (colonne de mercure, électrolyse),

» La Commission émet l'avis :

» Il n'y a pas lieu de modifier les définitions initiales des unités électriques du système pratique, définitions qui fixent pour ces unités des valeurs égales à des multiples décimaux exacts des unités du système C. G. S. électromagnétique. »

Les physiciens anglais vont accepter, j'en suis convaincu, avec plaisir cette résolution. Je crois aussi qu'elle trouvera bon accueil parmi mes collègues de la Commission S. U. N. (1).

LETTRE du D^r A. E. KENNELLY,
Président du Comité E. M. U. de la C. E. I.
à
M. le Professeur H. ABRAHAM,
Secrétaire général de l'Union internationale
de Physique pure et appliquée.

« J'ai l'honneur de vous informer que la Commission électrotechnique internationale, dans son assemblée plénière en Hollande et en Belgique, adopta sans opposition le système Giorgi d'unités pratiques absolues, communément désigné dans l'ordre mécanique comme système M. K. S. Il a été reconnu que, pour pouvoir compléter formellement le

(1) Note ajoutée le 18 octobre 1935. La résolution a été acceptée par les membres de la Commission S. U. N. presque sans exception.

système, quatre unités sont nécessaires. Il est admis que la quatrième unité devrait être choisie parmi les unités pratiques déjà adoptées, c'est-à-dire l'Ohm, le Volt, l'Ampère, le Coulomb, le Farad, l'Henry et le Weber. Le Weber est la nouvelle unité du flux magnétique dans le système électromagnétique, adoptée par la C. E. I., lors de la récente réunion plénière en Hollande et en Belgique.

» Il a été décidé que le choix ne serait pas fait, avant d'avoir consulté le Comité S. U. N. de l'Union internationale de Physique pure et appliquée, et le Comité international des Poids et Mesures (Comité consultatif d'Électricité).

» On a demandé au Professeur L. Lombardi d'entrer en rapport avec le Comité consultatif d'Électricité, et à moi-même avec le Comité S. U. N.

» Je me permets donc d'attirer la bienveillante attention du Comité S. U. N. de l'Union internationale de Physique pure et appliquée, dans l'espoir d'obtenir, s'il est possible, sa précieuse opinion sur cette question, qui est manifestement d'importance, aussi bien pour les physiciens que pour les électrotechniciens : car il serait évidemment très regrettable que le choix et la définition de la quatrième unité fondamentale pratique doivent, dans l'avenir, mener à un accord incomplet entre les unités pratiques utilisées en Physique et en Électrotechnique. »

Londres, 28 juin 1935.

LETTRE du Prof^r E. W. MARCHANT
à

Sir Richard GLAZEBROOK, K. C. B.

« Le D^r Kayner m'a écrit au sujet des réunions du Comité E. M. U. à Scheveningen. Il a été décidé que le système M. K. S. devrait avoir des unités qui soient en accord avec le système C. G. S.; et tous les représentants des différents pays ont été d'accord pour estimer qu'il était très désirable que le système pratique actuel fût élargi de façon à constituer un système cohérent d'unités. Quand on en vint, au Comité E. M. U., à discuter cette question, celle-ci fut divisée en deux parties. La première concernait seulement l'opportunité d'un système M. K. S. cohérent, sans spécifier la quatrième unité, et la seconde concernait le choix de la quatrième unité fondamentale. Sur la première question, tous les membres se déclarèrent en faveur de l'adoption du système M. K. S. avec quatre unités fondamentales, excepté le représentant de la Norvège qui s'abstint. Sur la deuxième question, le Comité décida de consulter d'une part le Comité consultatif du Comité international des Poids et Mesures, et d'autre part

la S. U. N. On a demandé au Dr Lombardi de préparer la question à soumettre au Comité consultatif du C. I. P. M., et au Dr Kennelly de préparer celle qui doit être soumise à la S. U. N.

» Quoiqu'il n'y ait rien dans les minutes des *Procès-Verbaux* établissant que la base de la décision concernant la quatrième unité devrait être que la perméabilité du vide doit être prise comme unité, ce point a été constamment soulevé dans la discussion, et la manière dont elle s'est terminée fut que l'on demanderait, aux Comités qui doivent être consultés, de donner à la quatrième unité une valeur, en accord avec le fait que la valeur de la perméabilité du vide soit égale à l'unité. Il a été accepté par tous que la quatrième unité à adopter (soit une unité de quantité d'électricité, soit une unité de résistance) doit être en accord avec le système d'unité C. G. S.; et la raison pour laquelle la question de la quatrième unité a été soumise aux deux Comités ci-dessus était que la Commission désirait que, quelle que fût l'unité choisie, celle-ci dût être en accord avec le système d'unités C. G. S.»

9 juillet 1935.

II. — Additif au Mémoire sur le Système des unités M. K. S.

LES UNITÉS ABSOLUES.

Le Système absolu d'unités électromagnétiques fut développé par le Comité de la British Association pour les *Étalons pratiques des mesures électriques*. Dans ce Comité Sir William Thomson (Lord Kelvin) et Clerk Maxwell furent les membres dirigeants, et le développement du système leur est principalement dû. Il peut être intéressant d'avoir ici un bref exposé de ce que l'on entend par « Système absolu ».

Mesures absolues.

Le sens donné au terme « Mesure absolue » fut clairement expliqué par le Comité de l'Association britannique dans son Rapport à l'Assemblée de Newcastle en 1863. Il fut statué :

« Le mot « absolu » dans le sens présent est employé en opposition au mot « relatif », et n'implique nullement que la mesure soit faite avec précision, ou que l'unité employée soit de construction parfaite; mais seulement que la mesure, au lieu d'être une simple comparaison avec une quantité arbitraire de la même espèce que celle qui est mesurée, soit faite par référence à cer-

taines unités fondamentales d'autre espèce traitées comme postulats.

» Pour la mesure absolue correcte, l'unité de force est définie comme la force capable de produire l'unité de vitesse dans l'unité de masse, quand elle a agi sur elle dans l'unité de temps. De là cette force agissant à travers l'unité d'espace représente l'unité absolue de travail. Dans ces deux définitions, temps, masse et espace sont seuls compris, et les unités dans lesquelles ils sont mesurés, c'est-à-dire la seconde, le gramme et le mètre (1), sont les seuls, dans ce qui suit, à être considérés comme unités fondamentales. »

Le Rapport, alors, continue à considérer les effets mécaniques, chimiques et thermiques dus à l'action électrique; et comme les effets chimiques et thermiques sont mesurés par référence à une unité mécanique de travail, ce Rapport conclut qu'il est seulement nécessaire, en développant un système absolu de mesure, de s'occuper de la liaison entre les grandeurs électriques et les unités mécaniques.

Nous sommes ainsi conduit à l'explication suivante d'un Système absolu de mesure :

Les systèmes électriques ou magnétiques exercent des forces et sont des sources d'énergie. Force et énergie sont mesurées en fonction de la longueur, de la masse et du temps.

Il peut être montré que les forces entre deux quantités d'électricité ou deux pôles magnétiques, mesurées en quelque unité que ce soit, sont proportionnelles au produit des charges ou des pôles, et inversement proportionnelles au carré de la distance qui les sépare. Les constantes de cette proportionnalité forment les chaînons nécessaires pour relier les quantités d'électricité ou de magnétisme avec les unités fondamentales. Une troisième constante est nécessaire pour déterminer la relation entre une quantité de magnétisme et un courant électrique. Ces trois constantes, couramment désignées par K_0 , μ_0 et A , sont ramenées à deux, parce qu'il peut être démontré que

$$\frac{A^2}{\mu_0 K_0} = C^2,$$

où C est la vitesse de propagation des ondes.

(1) Le mètre remplacé plus tard par le centimètre.

Pour former un système absolu de mesure électrique, il est absolument nécessaire de connaître *deux* de ces constantes qui, ainsi, forment les maillons reliant les quantités électriques et magnétiques avec les unités fondamentales de longueur, de masse et de temps. Telle est la base du système de mesure conçu par Maxwell et le Comité de l'Association britannique en l'année 1863.

Le Comité choisit comme unités fondamentales le centimètre, le gramme et la seconde, établissant ainsi le système C. G. S.; cela naturellement n'était pas nécessaire; il aurait pu prendre le mètre, le kilogramme et la seconde; mais le choix fut mis en délibération, et arrêté seulement après long examen ⁽¹⁾.

Pour compléter ce système électromagnétique, il avait dû choisir les valeurs des deux constantes μ_0 et A_0 . Il avait la liberté de choisir n'importe quelles valeurs qu'il lui plairait. Le choix déterminerait les unités en fonction desquelles les quantités de magnétisme et de courant d'électricité devraient être mesurées. Des recherches ultérieures montrèrent que μ_0/A représente la perméabilité, rapport de l'induction magnétique en un point de l'espace à la force magnétisante en ce point; et ce fut une initiative très naturelle d'admettre que ce rapport fût l'unité, c'est-à-dire de choisir la perméabilité du vide comme unité de perméabilité, ce qui conduit à $\mu_0/A = 1$ dans le système d'unités absolues C. G. S.

Une hypothèse supplémentaire était nécessaire en ce qui concerne A , et pour cette constante le Comité choisit la valeur de l'unité. Il établit ainsi le système absolu C. G. S. de mesure électrique avec le centimètre, le gramme et la seconde comme base, concurremment avec la valeur unité pour chacune des constantes nécessaires μ_0 et A . La dernière hypothèse que A égale l'unité, implique que $\mu_0 K_0 C^2$ est l'unité et par suite

$$K_0 = \frac{1}{\mu_0 C^2}.$$

Pour les buts mécaniques le système M. K. S. est excellent et a beaucoup d'avantages, le principal étant peut-être que le joule,

(1) Voir *B. A. Reports on Electrical Measurements: A Record of the History of « Absolute Units »* et le travail de lord Kelvin s'y rapportant. Réimprimé par l'Association, 1912 (Cambridge University Press). Voir aussi *Dictionary of Applied Physics*, vol. 2, page 941, article sur les unités de mesure électrique.

10^7 unités d'énergie C. G. S., est dans ce système d'unités. Mais, à mon avis, le système M. K. S. (Résistance) n'est pas un système absolu de mesure électrique. Une substance matérielle, une colonne de mercure, ou une bobine de fil ne peuvent d'eux-mêmes servir à relier les quantités électriques avec la longueur, la masse et le temps. Il y a peut-être un sens dans lequel le système M. K. S. (Ω l'ohm) peut être regardé comme une sorte de système absolu hybride, parce que l'ohm, 10^9 unités absolues C. G. S. de résistance, tel que l'a défini le Comité de la British Association, est par ce système lié aux unités de longueur, de masse et de temps. Personnellement je regretterais beaucoup de voir le mot « absolu » détourné de sa signification originale.

Le système M. K. S. peut naturellement devenir « absolu » pour les mesures électriques, exactement comme on a fait pour le système C. G. S. Trois constantes seront nécessaires; nous pouvons les appeler K_1 , μ_1 , A_1 . Elles seront reliées par l'équation

$$\frac{A_1^2}{\mu_1 K_1} = C_1^2,$$

où C_1 est mesuré en mètres par seconde.

Dans le système C. G. S., A est une constante sans dimensions arbitrairement prise égale à l'unité; nous pouvons convenir de faire l'hypothèse semblable dans le système M. K. S., et poser alors $A_1 = 1$ l'unité. Nous sommes ainsi libres d'admettre une valeur quelconque pour μ_1 , à la condition d'être conduits à $K_1 = (\mu_1 C_1^2)^{-1}$, et nous avons alors un deuxième système de « mesure absolue » tout à fait satisfaisant. Celui-ci différera en général du système C. G. S. Si, cependant, nous choisissons pour μ_1 la valeur 10^{-7} , le système M. K. S. conduit à des résultats pratiques identiques à ceux du système C. G. S., et le tableau ci-après donne les relations entre les différentes quantités qu'il contient. Il peut évidemment être étendu pour en contenir d'autres.

Ce qui précède explique brièvement la raison de mon désir que 10^{-7} , valeur de la perméabilité du vide dans le système M. K. S., soit choisie comme quatrième quantité fondamentale, requise par le système M. K. S. Il faut rappeler, naturellement, qu'une cinquième quantité semblable est nécessaire, et l'ensemble se complète en admettant pour valeur de A_1 l'unité, comme le fit pour A le Comité de la British Association.

A une récente Conférence à laquelle j'étais présent, on a posé la question : « Une quatrième unité est-elle nécessaire ? »

Tableau montrant la relation entre diverses quantités dans le système électromagnétique C. G. S. et dans le système M. K. S. proposé.

	Longueur.	Masse.	Temps.	Coefficient magnét. μ_0	Coefficient électromagnét. A .	Perméabilité du vide μ_0/A .	Coulomb.	Ampère.	Volt.	Ohm.
C. G. S.	1 (cm)	1 (gramme)	1 (seconde)	1	1	1	10^{-1}	10^{-1}	10^8	10^9
M. K. S.	1 (mètre)	1 (kilogramme)	1 (seconde)	10^{-7}	1	10^{-7}	1	1	1	1

Dans une théorie « Maxwell » moderne d'électricité, la perméabilité du vide, qui est mesurée par le rapport $\frac{\mu_0}{A}$, est supposée être une quantité ayant des dimensions. Par conséquent, sa valeur doit dépendre du système d'unités employé. Dans le système C. G. S., la perméabilité du vide a été choisie comme unité de perméabilité. Ainsi, dans ce système, puisque $A = 1$, la valeur de μ_0 est égale à 10^9 . Dans le système M. K. S. sa valeur est 10^{-7} , et dans le système M. K. S. « rationalisé », la valeur de μ_0 est $4\pi \cdot 10^{-7}$.

En même temps, la Commission S. U. N. désire saisir cette occasion pour enregistrer sa constatation du fait qu'il y a d'importantes théories électriques, soutenues par un certain nombre de physiciens, d'après lesquelles $A = C$, vitesse de propagation des ondes, et $\mu_0 k_0$ est un nombre pur.

Le sens de la réponse fut que la « quatrième unité » est nécessaire pour compléter les équations dimensionnelles. Elle n'est donc pas proposée dans le but de simplifier la théorie électromagnétique, ou de la placer sur une base plus solide, mais dans le but de combler une lacune présumée dans les équations dimensionnelles.

Les dimensions, suivant le terme employé par Maxwell, se réfèrent aux trois quantités fondamentales de longueur, de masse et de temps, et il se proposait d'exprimer toutes les quantités électriques en fonction de ces trois-là. Cela fut reconnu impossible. En utilisant des termes et symboles plus modernes, les quantités désignées actuellement par A , μ_0 , K_0 furent reconnues dépendantes les unes des autres, et sont reliées par l'équation $\frac{A^2}{\mu_0 K_0} = C^2$.

Maxwell suppose tacitement que A est 1 et n'a pas de dimensions, ce qui conduit au résultat $\mu_0 K_0 = \frac{1}{C^2}$. Les dimensions de $\mu_0 K_0$ sont celles de l'inverse du carré d'une vitesse, mais sans de nouvelles hypothèses (*assumptions*) nous ne pouvons aller plus loin.

Maxwell indique que deux hypothèses sont possibles : dans l'une, hypothèse électromagnétique, μ_0 est traité comme une constante sans dimensions de valeur unité; nous avons ainsi le système électromagnétique, dans lequel, par exemple, les dimensions d'une résistance sont celles d'une vitesse, les dimensions d'un coefficient d'induction sont celles d'une longueur, etc. Dans le système électrostatique, K_0 est traité comme une constante sans dimensions, de valeur égale à l'unité.

Mais il y a une autre solution de l'équation $\mu_0 K_0 = \frac{1}{C^2}$. Nous pouvons supposer que μ_0 et K_0 ont tous deux des dimensions inconnues en longueur, masse et temps, mais qu'ils sont liés de façon que les dimensions de leur produit soient celles de $\frac{1}{C^2}$. Les dimensions d'un coefficient d'induction sont alors celles de $\mu_0 \times L$, les dimensions d'une résistance sont celles de $\mu_0 \frac{L}{T}$, et sont, toutes deux, inconnues. Mais on ne gagne effectivement rien en prenant l'une de ces quantités comme « quatrième unité », et en la traitant, soit comme une quatrième dimension

additionnelle à celles de longueur, masse et temps, soit comme une quantité de dimensions inconnues en longueur, masse et temps.

La première alternative est une complication supplémentaire de la théorie électromagnétique, elle peut simplifier certaines équations dimensionnelles; la seconde est appuyée par l'adoption par la C. E. I. de la décision que « μ_0 possède des dimensions physiques ».

Ce qui est nécessaire pour que le système M. K. S. soit placé sur une base solide, c'est qu'on se rende compte du fait que les deux quantités Λ_0 et μ_0 sont essentielles et que, si les unités du système doivent être les unités pratiques du système C. G. S., leurs valeurs (non rationalisées) doivent être 1 et 10^{-7} , et (rationalisées) 1 et $4\pi \cdot 10^{-7}$.

Il doit naturellement être reconnu qu'une autre solution de l'équation $\frac{\Lambda^2}{\mu_0 K_0} = C^2$ nous est offerte. Comme Gauss, nous pouvons poser $\Lambda = C$, et alors $\mu_0 K_0$ devient un nombre pur.

ANNEXE E13.

MÉMORANDUM

SUR

LE SYSTÈME M. K. S.

Par le Prof. A. E. KENNELLY.

Le système Giorgi des unités M. K. S., basé sur :

1° le Mètre international, tel qu'il est conservé au Bureau international des Poids et Mesures;

2° le Kilogramme international, tel qu'il est conservé au Bureau international des Poids et Mesures;

3° la seconde du temps solaire moyen, telle qu'elle est conservée par l'Union astronomique internationale;

4° une unité électromagnétique pratique à choisir dans la série internationale (ohm, volt, coulomb, ampère, farad, joule, watt, henry et weber);

a été officiellement et unanimement adopté par la C. E. I. (Commission électrotechnique internationale) dans sa récente réunion plénière (17-25 juin 1935) à Scheveningen-Bruxelles.

M. Paul Janet est Président d'honneur de la C. E. I.

La C. E. I. a différé le choix de la quatrième unité fondamentale (n° 4 ci-dessus), jusqu'à ce que l'opportunité ait été offerte de consulter l'opinion :

a. du C. C. E. (Comité consultatif d'Électricité) — Président, M. Paul Janet — du Comité international des Poids et Mesures;

TABLEAU I. — LISTE INCOMPLÈTE DES UNITÉS M. K. S. ET DE LEURS CORRESPONDANTE EN UNITÉS C. G. S.

N ^o .	QUANTITÉ.	SYMBOLE.	UNITÉS M. K. S.	UNITÉS C. G. S.	UNITÉS C. G. S. dans une unité M. K. S.
<i>Mécanique.</i>					
1.	Longueur.....	L	mètre	centimètre	10 ²
2.	Masse.....	M	kilogramme	gramme	10 ³
3.	Temps.....	T	seconde	seconde	1
4.	Surface.....	S	m ²	cm ²	10 ⁴
5.	Volume.....	V	m ³	cm ³	10 ⁶
6.	Fréquence.....	<i>f</i>	hertz, cycle/s	cy/s, per/s	1
7.	Density.....	<i>d</i>	kg/m ³	g/cm ³	10 ⁻³
8.	Specific gravity.....		nombre	nombre	1
9.	Vitesse.....	<i>v</i>	m/s	cm/s	10 ²
10.	Lenteur.....		s/m	s/cm	10 ⁻²
11.	Accélération.....	<i>a</i>	m/s ²	cm/s ²	10 ²
12.	Force.....	F	joule/m	dyne	10 ⁵
13.	Pression.....	<i>p</i>	joule/m ³	barye	10
14.	Angle.....	$\alpha\beta$	radian	radian	1
15.	Vitesse angulaire.....	ω	rad/s	rad/s	1
16.	Torque.....	τ	joule/rad	erg/rad	10 ⁷
17.	Moment d'inertie.....	J	kg.m ²	g.cm ²	10 ⁷
<i>Énergétique.</i>					
18.	Travail ou énergie.....	W	joule	erg	10 ⁷
19.	Travail angulaire ($\tau\alpha$).....	W	joule	erg	10 ⁷
20.	Énergie volumique.....	ω	joule/m ³	erg/cm ³	10
21.	Puissance active.....	P	watt	erg/s	10 ⁷
22.	Puissance réactive.....	Q	var	erg/s	10 ⁷
23.	Température.....	θ	°C ou °K	°C ou °K	1
<i>Lumière.</i>					
26.	Intensité.....	I	bougie	bougie	1
27.	Flux lumineux.....	Ψ	lumen	lumen	1
28.	Éclairement.....	E	lux	phot	10 ⁻⁴
29.	Brillance.....	<i>b</i>	bougie/m ²	stilb	10 ⁻⁴
30.	Pouvoir focal.....		dioptrie		10 ⁻²
<i>Électricité.</i>					
31.	Force électromotrice.....	E	volt		10 ⁸
32.	Gradient de potentiel.....	ϵ	volt/m		10 ⁶
33.	Résistance.....	R	ohm		10 ⁹
34.	Résistivité.....	ρ	ohm.mètre		10 ¹¹
35.	Conductance.....	G	siemens, mho		10 ⁻⁹
36.	Conductivité.....	γ	siem/m; mho/m		10 ⁻¹¹
37.	Réactance.....	jX	ohm		10 ⁹
38.	Impédance.....	Z	ohm \angle		10 ⁹
39.	Quantité.....	Q	coulomb		10 ⁻¹
40.	Déplacement.....	Q	coulomb		10 ⁻¹
41.	Courant.....	I	ampère		10 ⁻¹
42.	Densité de courant.....	<i>i</i>	A/m ²		10 ⁻³
43.	Capacité.....	C	farad		10 ⁻⁹
44.	Cap. ind. spéc.....	ϵ/ϵ_0	nombre	nombre	1
<i>Magnétisme.</i>					
45.	Flux magnétique.....	Φ	weber	maxwell	10 ⁸
46.	Densité de flux.....	B	weber/m ²	gauss	10 ⁴
47.	Inductance.....	L	henry		10 ⁹
48.	Perméabilité relative.....	μ/μ_0	nombre	nombre	1

TABLEAU II. — LISTE DES UNITÉS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES M. K. S. AFFECTÉES PAR LA QUESTION DIFFÉRÉE DE LA RATIONALISATION.

N°.	QUANTITÉ.	SYMBOLE.	NOM DES UNITÉS M. K. S.		NOMBRE D'UNITÉS non rationalisées dans une unité rationalisée.
			rationalisées.	non rationalisées.	
<i>Électricité.</i>					
49.	Flux électrique.....	Ψ	coulomb	-	-
50.	Densité de flux.....	D	coulomb/m ²	-	-
51.	Permittivité spatiale.....	ϵ_0	farad/m	-	-
52.	Élastivité spatiale.....	σ_0	m/farad	-	-
53.	Élastance.....	S	daraf	-	-
<i>Magnétisme.</i>					
54.	Force magnétomotrice.....	\mathcal{F} ou M	ampère-tour	-	4π
55.	Force magnétisante.....	H	At par mètre	-	4π
56.	Perméabilité spatiale.....	μ_0	henry/m	-	$1/4\pi$
57.	Réductivité spatiale.....	ν_0	m/henry	-	4π
58.	Perméance.....	\mathcal{P}	weber/At	-	$1/4\pi$
59.	Réductance.....	\mathcal{R}	At/weber	-	4π
60.	Intensité de pôle.....	m	weber;	-	$1/4\pi$
61.	Moment magnétique (ml).....	\mathcal{M}	weber/m	-	$1/4\pi$
62.	Aimantation.....	j	weber/m ²	-	$1/4\pi$

TABLEAU III. — VALEURS NUMÉRIQUES DES CONSTANTES SPATIALES DANS LE SYSTÈME M.K.S. RATIONALISÉ OU NON RATIONALISÉ.

N°.	QUANTITÉ.	SYMBOLE.	RATIONALISÉ.	NON RATIONALISÉ.
<i>Électricité.</i>				
51.	Permittivité.....	ϵ_0	$10^7/4\pi c^2 = 8,854 \times 10^{-12}$	$10^9/c^2 = 1,113 \times 10^{-10}$
52.	Élastivité.....	σ_0	$4\pi c^2/10^7 = 1,129 \times 10^{11}$	$c^2/10^7 = 8,988 \times 10^9$
<i>Magnétisme.</i>				
56.	Perméabilité.....	μ_0	$4\pi/10^7 = 1,257 \times 10^{-6}$	10^{-3}
57.	Réductivité.....	ν_0	$10^7/4\pi = 0,7958 \times 10^6$	10^7

b. du Comité S. U. N. (Symboles, Unités et Nomenclature)
— Président, Sir Richard Glazebrook — de l'Union internationale
de Physique pure et appliquée.

Le Comité S. U. N. a déjà apporté dans le passé une aide
précieuse à la C. E. I. dans l'étape préliminaire du travail de la
C. E. I. vers l'adoption du système M. K. S.

Un examen de la liste ci-jointe des unités dans le système M. K. S.
avec les unités C. G. S. correspondantes montrera que :

1° le système C. G. S. n'est pas troublé par l'introduction de
l'usage du système M. K. S. ;

2° les unités électromagnétiques existantes sont contenues dans
le système M. K. S. comme éléments constituants ;

3° le système M. K. S. est simple et complet, n'exigeant pas
un sous-système électrostatique associé parallèlement. Tous les
phénomènes électrostatiques se combinent facilement avec les
séries électromagnétiques M. K. S. ;

4° le système M. K. S. permet à chaque auteur d'employer les
unités rationalisées ou non rationalisées, suivant ce qu'il préfère.
La C. E. I. a différé de prendre une décision entre la rationalisa-
tion et la non-rationalisation.

La valeur de la vitesse de transmission c est prise ici égale à
 $2,998 \times 10^8$ m/s et celle de c^2 à $8,988 \times 10^{16}$ (m/s)².

En admettant de petites différences, de quelques dix-millièmes,
entre certains étalons existants et leur valeur absolue estimée,
l'adoption future d'une quatrième unité fondamentale pour com-
pléter la base du système Giorgi peut altérer légèrement quelques-
unes des constantes numériques du Tableau III.

Voir C. E. I., document de juin 1934 « Mémoire sur le
système M. K. S. des unités pratiques » par G. Giorgi.

ANNEXE E14.

MÉ MORANDUM

DU PROF.-ING. G. GIORGI

CONCERNANT

LE CHOIX DE LA QUATRIÈME UNITÉ FONDAMENTALE.

La Commission électrotechnique internationale, au cours des
réunions de Scheveningen et de Bruxelles, les 17 et 30 juin 1935,
a décidé d'adopter le système d'unités proposé par G. Giorgi en
1901. Ce système est basé sur :

Le mètre, comme unité de longueur ;

Le kilogramme, comme unité de masse ;

La seconde, comme unité de temps ;

celles-ci étant combinées en un système absolu avec les unités
électrotechniques usuelles (coulomb, ampère, volt, ohm, henry,
farad) ; le weber comme unité pratique de flux a été adjoint à
ces unités.

Scientifiquement parlant, c'est abolir simultanément les procédés
de définition « électrostatique » et « électromagnétique », et au
lieu de cela adopter une quatrième unité fondamentale qui peut
être une quelconque des unités électrotechniques mentionnées
ci-dessus.

La question s'est posée de savoir laquelle de ces unités recevra
le qualificatif de « fondamentale », et comment normaliser
celle-ci. La C. E. I. a décidé de ne pas régler tout de suite la
question, mais de demander l'avis du Comité consultatif de Sèvres
et du Comité S. U. N. de l'Union internationale de Physique, et
de présenter alors la question à la prochaine réunion de la C. E. I.

Deux points de vue peuvent être considérés concernant ladite question : le point de vue théorique et le point de vue métrologique.

Pour l'exposition de la théorie de l'électricité, et pour l'écriture des équations et des formules dimensionnelles, sans doute le choix de l'ampère (ou ce qui revient à peu près au même, du coulomb) est-il le plus naturel. Mais si l'on a en vue l'étalonnage métrologique, le choix tombe nécessairement sur l'ohm, en raison de ce que la conservation d'un étalon de résistance métallique peut être maintenant assurée à moins de 1 millionième, et que la comparaison entre deux résistances égales peut être réalisée à moins de 1 dix-millionième. Aucune autre espèce de mesures électriques ne peut approcher ces limites de précision.

Ainsi l'ohm sera-t-il normalisé par un étalon matériel métallique, qui pourrait être conservé à Sèvres, en même temps que le mètre et le kilogramme. L'ohm ainsi défini peut être appelé ohm « définitif » ou « fondamental ». Nous sommes conduits à cette proposition :

La quatrième unité fondamentale sera l'ampère définitif; celui-ci est défini comme le courant de valeur constante qui, traversant l'ohm définitif, développe la puissance d'un watt mécanique.

Par watt mécanique on entend l'unité de puissance dérivée du mètre, du kilogramme-masse et de la seconde.

Le point à considérer maintenant est la fixation de la valeur de ces unités.

Nous avons actuellement deux séries de valeurs pour les unités électrotechniques; celles de la vieille définition théorique, qui rendait celles-ci égales à des multiples exacts des unités C. G. S., sans toutefois les réaliser effectivement sous forme d'étalons; celles de la série désignée par « internationale », définies comme dérivées de l'ohm à mercure et de l'ampère électrolytique de 1893. Ces unités internationales sont réalisées sous forme d'étalons et sont dans l'usage pratique : c'est d'après ces unités que sont étalonnés tous les instruments existant dans les laboratoires.

Les deux séries ne sont pas d'accord.

Le plus récent progrès des mesures dites « absolues » a montré que :

a. L'ohm international actuellement en usage est égal à $1,000\ 45 \cdot 10^9$ unités C. G. S. é. m.;

b. L'ampère international est égal à $0,999\ 993$ unités C. G. S. é. m.;

c. Le volt international est égal à $1,000\ 38 \cdot 10^8$ unités C. G. S. é. m.

Maintenant, il y a deux opinions. Quelques-uns pensent qu'il est convenable d'amener les unités électrotechniques en accord aussi parfait que possible avec la définition originale : ceci exige un grave changement de l'ohm (d'environ $1/2000$), et par suite du farad et du henry, et quelques changements moins importants du volt et de l'ampère. D'autres désirent que les valeurs nouvelles ou « définitives » ne diffèrent pas des unités internationales actuellement utilisées.

Nous remarquons que puisqu'on a écarté le procédé de définition électromagnétique, en reconnaissant l'avantage des quatre unités fondamentales, il n'y a aucune raison scientifique en faveur du maintien de la définition originelle. La question de l'ohm est la même que celle du mètre. *Il n'existe pas de bon ohm ou mauvais ohm.* Tous les ohms sont également absolus dans le système M. K. S. En fait, dans ce système, l'ohm doit être considéré comme arbitraire et défini par un étalon matériel, tout comme le mètre.

Changer actuellement l'ohm provoquerait énormément de troubles et de confusion; l'état des choses n'est pas le même que lorsque l'ohm légal fut changé en l'ohm international. Il y a actuellement une quantité immense d'argent et de travail investie dans les instruments de nos laboratoires (boîtes de résistance, ponts, capacités, boîtes d'inductance, etc.), et tout cela sera bouleversé si nous modifions l'ohm d'une quantité aussi grande que $1/2000$. En même temps, l'avantage théorique de posséder un ohm conforme à la définition originelle est nul; en tout cas pas plus grand que celui qu'on obtiendrait en mettant le mètre en accord avec le quart du méridien terrestre.

Songeons que tous les physiciens expérimentateurs ont toujours exécuté leurs expériences avec des instruments ajustés suivant les étalons internationaux; même quand ils ont exprimé les résultats en unités C. G. S., celles-ci étaient les valeurs conventionnelles des unités C. G. S., non les vraies valeurs. Le changement de l'ohm viendrait troubler tout cela.

On doit remarquer également que les mesures « absolues » ne sont pas susceptibles d'une précision meilleure que $1/100\ 000$, ce

qui est cent fois plus mauvais que la précision réalisable dans la reproduction d'un étalon matériel. Même si nous définissons le nouvel ohm en fonction des unités C. G. S., cela ne constituera qu'une définition formelle, et pratiquement l'ohm demeurera fixé par l'étalon matériel.

Il est alors préférable de fixer le nouvel ohm aussi égal que possible à l'ohm international; ce dernier, cependant, étant défini par l'étalon de mercure, possède une marge d'indétermination : c'est à l'intérieur de cette marge que doit être fixé l'ohm définitif, mais plus finement défini de façon que l'incertitude soit de un millionième, ou moins, comme il est indiqué ci-dessus.

Si l'on normalise l'ohm, le henry (= seconde \times ohm) et le farad (= seconde/ohm) demeureront normalisés comme conséquence directe et seront en accord étroit avec les valeurs actuellement en usage.

En ce qui concerne le volt et l'ampère, un petit changement de leur valeur n'est pas critiquable, car ces unités ne fournissent pas un point de départ pour des boîtes étalonnées, et les ampèremètres et les voltmètres les plus précis ne donnent pas d'indication meilleure que 1/1000. En fait, un petit changement des valeurs internationales est nécessaire, car le produit de ces valeurs (qui est le watt international) excède de 3/10000 le watt mécanique, tel qu'il est défini par le mètre, le kilogramme et la seconde. De plus, les valeurs internationales, étant basées sur l'électrolyse du voltamètre à argent, sont peu précises: la définition adoptée ne fixe que quatre chiffres significatifs.

Il faut que le nouveau volt et le nouvel ampère soient normalisés par une nouvelle méthode aussi précise que possible, et que leurs valeurs soient de 15/100000 inférieures aux valeurs internationales actuellement en usage. Ce changement n'exige l'altération d'aucun instrument existant : mais simplement le changement des étiquettes des éléments Weston actuellement employés comme étalons secondaires dans les laboratoires.

Toutes les autres unités dérivent de celles-ci.

Normalisation pratique.

Il est entendu que les étalons de résistance à mercure sont impropres, parce qu'ils ne peuvent atteindre l'exactitude qui est maintenant requise. Des étalons solides métalliques seraient préférables.

Ceux-ci pourront être faits par exemple en platine pur, maintenu à la température de la glace fondante : on a maintenant des moyens pour maintenir et reproduire cette température à 1/10000 de degré centésimal centigrade; cela correspond à une exactitude d'environ 1/2000000 en ce qui concerne la valeur de la résistance. Ou bien ils pourront être faits de quelque alliage spécial préparé expressément de façon à avoir un coefficient de la température négligeable et de bonnes qualités de conservation; des essais sont faits dans cette direction. Ou bien un certain nombre d'ohms matériels de différentes constitutions peuvent être préparés, et la valeur étalon définie comme la valeur moyenne de ceux-ci. La conservation de l'étalon, ou des étalons, et l'étude de leur comportement pourraient être la tâche du Bureau international à Sèvres.

Pour les applications pratiques cependant, l'étalon de résistance n'est pas suffisant, car la mesure de l'équivalent mécanique de l'énergie électrique est une mesure très difficile et ne conduit pas à des résultats très exacts. C'est pourquoi un second étalon subsidiaire d'une autre grandeur électrique est nécessaire. Les règles pour les séries internationales d'unités, actuellement en usage, définissent comme second étalon celui du courant électrique, l'ampère, au moyen du voltamètre à argent; et le volt demeure actuellement défini comme le produit de l'ohm et de l'ampère.

Ce n'est probablement pas le meilleur procédé. Il semble que la comparaison avec la pile étalon fournisse une meilleure précision que celle du voltamètre à argent. C'est pourquoi la proposition suivante doit être envisagée : définir le nouveau volt au moyen de l'élément normal Weston construit d'après les spécifications déterminées; et ainsi, tous les laboratoires peuvent en déduire aisément l'ampère fondamental, par l'emploi de sous-étalons de l'ohm et de la pile Weston. La f. é. m. de la pile étalon sera d'environ 1,01829 nouveau volt.

Plusieurs piles associées en série peuvent être utilisées de façon à donner une très bonne exactitude dans les mesures.

En résumé, les limites d'exactitude du maintien et de la reproduction des étalons seront d'environ : 1/1000000 (ou mieux) pour l'ohm, 1/100000 (ou mieux) pour l'ampère et le volt, et probablement aussi pour les autres unités.

Mesures absolues.

Quand nous pesons 1 décimètre cube d'eau, nous pouvons dire que nous exécutons une détermination absolue du kilogramme; mais il serait mieux de dire que c'est là une mesure de la densité de l'eau. Personne actuellement ne propose de changer le kilogramme, de façon à le rendre égal à la définition originale; tout le monde accepte de dire que la densité de l'eau dans les conditions normales est $999^{kg},973$ par mètre cube.

Les mesures dites absolues étaient précédemment considérées comme des déterminations de l'ohm, du volt, de l'ampère, etc., absolus. Le point de vue moderne est de les considérer comme des déterminations expérimentales des constantes du vide ϵ_0 et μ_0 .

Leur utilité métrologique sera de préciser le rapport entre l'ohm étalon et l'unité C. G. S. Il n'est aucunement nécessaire que ce rapport soit un nombre entier: sa connaissance fournit une méthode auxiliaire pour vérifier la permanence de l'étalon. Pratiquement ce rapport peut ne pas être connu avec un nombre suffisant de chiffres (actuellement seulement à $1/100000$ dans les meilleures conditions).

Autrement nous pourrions spécifier que le nouvel ohm égale $1,00045 \times 10^9$ unités C. G. S.

*Ce que nous demandons au Comité consultatif
de Sèvres et au Comité S. U. N.*

(et aussi aux Bureaux nationaux de Mesures.

Les questions à poser devant ces organismes peuvent être les suivantes:

1° Quelles sont les meilleures méthodes pour construire un étalon matériel de résistance? Quelle précision est réalisable dans sa conservation et dans la reproduction des sous-étalons à partir du premier?

2° Quelles sont les meilleures déterminations de l'équivalent mécanique de l'énergie électrique?

3° Puisqu'il est reconnu que, pour l'usage pratique, un étalon est nécessaire en plus de la résistance, sera-t-il préférable d'étalonner le courant électrique par un voltamètre à nitrate d'argent,

ou par un électrodynamomètre, ou bien étalonner la force électromotrice au moyen de l'élément Weston normal?

Quelle limite de précision est réalisable pour la reproduction de l'étalon et des sous-étalons dérivés du premier?

4° Quelles sont les valeurs les plus récentes et les mieux déterminées pour le rapport entre les étalons internationaux existants et les unités électromagnétiques C. G. S.?

Prenant comme base ces réponses, la C. E. J. sera en mesure de décider le choix de la quatrième unité fondamentale et la définition des nouveaux étalons.

En pratique, l'ordre d'exécution pour arriver finalement aux étalons définitifs devrait être le suivant:

1° Construire l'étalon matériel de l'ohm définitif (soit en accord avec l'ohm international, soit aussi voisin que possible d'un multiple entier simple des unités C. G. S.), de telle façon qu'il soit possible de le maintenir invariable et de l'adopter pour toujours;

2° Répéter avec la plus haute précision les déterminations de l'équivalent mécanique de l'énergie électrique, et déterminer alors la valeur de l'ampère définitif qui remplisse aussi précisément que possible la condition de développer un watt mécanique, quand il s'écoule à travers l'étalon de l'ohm;

3° Matérialiser ledit ampère sous forme d'étalon pour l'usage expérimental, soit par le voltamètre à argent, soit par le rapport entre la force électromotrice de l'élément normal Weston et le volt étalon (chute de potentiel de l'ampère étalon à travers l'ohm étalon).

Rome, 10 septembre 1935.

ANNEXE E15.

MÉMORANDUMS

PRÉSENTÉS

AU COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
ET A SON COMITÉ CONSULTATIF D'ÉLECTRICITÉ

Par M. GEORGE A. CAMPBELL.

I. — PRÉSENTATION ABRÉGÉE DU " SYSTÈME DÉFINITIF " (1).

M. J. E. Sears, Jr. m'a écrit qu'il avait été fort intéressé, en tant que membre du Comité international des Poids et Mesures, par ma publication de 1933 intitulée *Un système définitif d'unités*; il me suggère d'envoyer un exemplaire de cette communication à tous les membres du Comité international et de son Comité consultatif d'Électricité, et de leur présenter mes idées sous un angle un peu différent, de façon que le système définitif d'unités ait le plus de chance d'attirer dès maintenant l'attention de ceux qui sont directement intéressés au maintien des étalons primaires de mesure.

C'est pourquoi je fais ressortir dans ce qui suit deux avantages principaux de ce système comparé avec le système « absolu » des unités électriques.

Premier avantage : un système fondamental universel (comprehensive).

(1) Cette Note se réfère aux publications ci-après : *A definitive System of Units*, par G. A. CAMPBELL (*Bull. of the National Research Council*, 1933); *Mémoire sur le Système M. K. S. d'Unités pratiques*, par G. GIORDI (*Publication du Bureau central de la C. E. I.*, septembre 1934).

Le système définitif combine en un seul système cohérent les unités mécaniques pratiques (mètre, kilogramme, watt, etc.) et les unités électriques pratiques (ohm, volt, farad, etc.); aucun système « électromagnétique » ne comprend d'autre part un jeu complet d'unités pratiques à la fois pour la mécanique et pour l'électricité.

La proposition définitive est que le Bureau international et les laboratoires nationaux choisissent le système définitif d'unités comme leur système fondamental en raison de ce que :

a. Il est directement fondé sur leurs étalons primaires concrets du mètre, du kilogramme et de l'ohm associés avec la seconde de temps;

b. Ses unités primaires et dérivées comprennent le plus grand nombre possible d'unités commodes pour la mécanique, l'électricité et le magnétisme;

c. Ses formules pratiques et théoriques sont les plus simples possible;

d. Il est ainsi admirablement fait pour la compréhension mutuelle, là où le commerce, l'industrie et la science recherchent tous leurs étalons ultimes.

La proposition « absolue », d'autre part signifie qu'on s'attache à l'emploi antérieur des huit unités pratiques reconnues comme un système incomplet aussi bien du côté mécanique que du côté magnétique et qu'on supplémente ce système incomplet en utilisant divers autres systèmes : systèmes centimètre-gramme-seconde électromagnétique et électrostatique, système de Gauss, système de Lorentz, etc. Cette multiplicité de systèmes est troublante et gênante pour le commerce, l'industrie et la science.

Deuxième avantage : moins de perturbations à l'origine et par la suite.

L'ohm définitif est pris égal à la valeur moyenne de l'ohm actuellement en usage pour éviter les perturbations à l'origine et dans l'avenir, qui seraient provoquées par la substitution présente de l'ohm et du volt « absolus » à l'ohm et au volt internationaux.

La proposition pour l'ohm définitif est que le Comité international :

a. Fixe la valeur de l'ohm à une valeur moyenne des étalons nationaux actuels de l'ohm;

b. Utilise cette valeur comme l'ohm nouveau pour faire l'éta-
lonnage initial de tous les étalons de résistance.

c. Utilise tout nouvel étalonnage qui pourrait être nécessaire, à de longs intervalles, uniquement pour corriger la dérive des étalons à partir de leurs valeurs initiales. Ceci fournirait un certain nombre d'étalons physiques concrets de l'ohm sur une base bien semblable à celle des étalons concrets du mètre et du kilogramme. Il faut bien reconnaître qu'actuellement la stabilité des étalons de l'ohm soulève plus d'un problème que ne soulève pas la stabilité des étalons du kilogramme; mais cela est également vrai quelle que soit la valeur choisie pour l'ohm. A l'égard de l'ohm définitif, les mesures absolues ne serviraient uniquement que comme une ancre au vent.

La proposition de l'ohm « absolu » se complique d'autre part par trois valeurs distinctes de l'ohm : la valeur abstraite « absolue », la valeur de sa réalisation matérielle de 1908, et la valeur de sa nouvelle réalisation matérielle. Le fait que la différence entre la nouvelle et l'ancienne réalisation est plus grande que les tolérances actuelles des résistances, implique des réajustages initiaux coûteux ou des réétalonnages gênants pour beaucoup de laboratoires scientifiques et industriels répartis dans le monde entier. De plus, il n'y a aucune garantie que des troubles semblables ne puissent encore renaître à un moment quelconque, du fait d'une nouvelle réalisation de l'ohm absolu, pour la même raison que le changement projeté en 1935.

Commentaires historiques. — En 1873, Maxwell montrait que si un système « électromagnétique » est fondé sur des unités commodes de longueur, de masse et de temps, il ne comprend pas d'unités commodes de résistance, et inversement. Ainsi un système comprend le mètre et le 10^{-7} ohm, un autre les 10^7 mètres et l'ohm; mais aucun ne comprend à la fois le mètre et l'ohm qui sont commodes (*Electricity and Magnetism*, art. 629). C'est la première objection au système « absolu ».

Depuis 1878 jusqu'à nos jours, diverses redéterminations de l'ohm absolu ont été faites. Les écarts résultants ont souligné la difficulté expérimentale de la réalisation d'un étalon de l'ohm « absolu » avec la précision nécessaire. C'est la seconde objection au système « absolu ».

En 1901, le professeur G. Giorgi indiqua que les deux objections précédentes pouvaient être évitées en adoptant le système M. K. S. Ω, qui prend comme unité électrique primaire la valeur d'un ohm concret, et non celle de la perméabilité du vide. La solution était ainsi idéalement simple. Elle est mieux décrite dans son memorandum de 1934. Des faits appuyant ses arguments peuvent être trouvés dans ma brochure de 1933. Ainsi (1) les tableaux 1 et 3 montrent que les unités sont des unités populaires, et qu'elles demeurent dans les tolérances commerciales, même en tenant compte des différences actuelles entre les unités internationales. De plus, les deux tableaux supplémentaires, numérotés 1 et 4, indiquent des définitions des unités basées sur le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ohm, et font ressortir la simplicité des formules définitives en comparaison avec celles des autres systèmes.

En février 1933, les recommandations du Comité consultatif comprenaient toutes les mesures requises pour assigner une valeur définitive à chaque étalon de résistance et à chaque élément étalon. Ainsi les intercomparaisons des étalons de résistance déterminent la valeur moyenne de l'ohm et une valeur définitive pour chaque étalon de l'ohm; les mesures « absolues » des étalons de résistance assignent la valeur expérimentale définitive pour la perméabilité du vide; finalement les intercomparaisons des éléments étalons et leurs mesures « absolues » déterminent une valeur définitive pour chaque élément étalon.

Conclusion. — Dans la présentation précédente, deux avantages importants du système définitif ont été confrontés avec deux objections sérieuses au système « absolu ». On a montré qu'on peut acquérir les avantages et écarter les objections en choisissant l'ohm à la place de la perméabilité du vide, comme quatrième unité requise pour la spécification des quantités électriques. Le Comité international a actuellement une occasion unique d'opérer le changement. Tous les faits établis me paraissent montrer incontestablement que les valeurs définitives de l'ohm et du volt devraient être les nouvelles unités internationales, adoptées par le Comité international.

Bell Telephone Laboratories, New-York, 2 août 1935.

(1) *Loc. cit.*

II. — LA QUATRIÈME UNITÉ INDÉPENDANTE DE GIORGI POUR LE SYSTÈME M. K. S. DES UNITÉS MÉCANIQUES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES.

La lecture attentive du mémorandum confidentiel de Sir Richard Glazebrook sur le système d'unités M. K. S. ne révèle aucune objection décisive à la proposition de Giorgi. Dans mon opinion, il se confirme que l'ohm moyen international de Giorgi devrait être adopté comme la quatrième unité indépendante métrologique, en raison de ses avantages exceptionnels, parce que :

1° Il provoque le minimum de corrections aux étalons existant (qui sont en accord avec l'emploi de la seconde et du watt mécanique) pour l'ohm, le volt, l'ampère, le henry et le farad. Puisque les corrections en question sont en fait inférieures aux tolérances des appareils de précision commerciale, il évite les retards, les ennuis et la confusion qui seraient la conséquence du changement plus radical à l'ohm absolu.

2° Il élimine la dualité actuelle en abandonnant la tentative inutile de matérialiser l'ohm théorique « absolu » en un étalon de l'ohm, et en concentrant l'attention du Bureau international et des Laboratoires nationaux sur l'obligation de corriger les nouveaux étalons matériels de l'ohm de toute dérive qui puisse venir affecter leur valeur. Comme on peut utiliser le même groupe d'étalons matériels, les mêmes précautions, et les mêmes mesures de précision pour l'ohm de Giorgi, aussi bien que pour un ohm absolu quelconque, il en résulte que l'ohm étalon Giorgi peut être maintenu d'une année à l'autre avec la meilleure précision actuellement accessible pour un étalon quelconque de l'ohm. Le Comité consultatif estime désirable, même pour les laboratoires de précision, de se fier à la stabilité des étalons matériels de l'ohm, plutôt qu'à des déterminations absolues de l'ohm. Je me réfère ici à la recommandation très significative du Comité consultatif de 1933, qui est basée sur la précision relativement faible, aujourd'hui comme dans le passé, des déterminations absolues.

« Deuxième vœu. — Bien qu'il ne soit pas possible d'atteindre » actuellement dans les déterminations absolues une précision » supérieure au cent-millième, le Comité consultatif estime que, » pour la pratique des laboratoires de précision, il y a lieu d'attribuer aux étalons de résistance et de force électromotrice » des valeurs exprimées à un 1 millionième près » (*Procès-*

verbaux du Comité international des Poids et Mesures, t. XV, 1933, p. 161).

3° Il facilite (mais n'impose pas) l'emploi d'un système d'unités électriques (et d'un seul) et de formules à la fois comme système de base de la physique théorique, et comme système pratique du commerce, de l'industrie et de la science. Cette simplification très souhaitable est impossible tant que le système électromagnétique avec son unité de perméabilité imposée sera retenu comme système de base. Une raison profonde fut reconnue par Maxwell en 1863, comme je l'ai expliqué dans ma « Présentation abrégée » du 2 août 1935 soumise aux Comités.

Je désire attirer spécialement l'attention sur une nouvelle démarche en faveur du système définitif, qui a été présentée par le D^r L. Hartshorn, du National Physical Laboratory, dans le paragraphe concernant les « unités et étalons » de sa communication « Electric and Magnetic Measurements » dans les Rapports de 1934 à la Physical Society; ainsi que sur une lettre parue dans « Nature » du 7 septembre 1935, par L. Hartshorn et P. Vigoureux.

Résumé. — Mes réponses aux deux questions posées par la lettre d'envoi de Sir Richard Glazebrook seraient par conséquent les suivantes :

Je ne suis pas d'avis qu'on maintienne la définition des unités pratiques en tant que multiples décimaux exacts des unités électromagnétiques C. G. S. de Maxwell, ni que l'on continue à considérer ce système Maxwell comme le système fondamental du physicien.

Je crois que la quatrième unité métrologique indépendante devrait être égale à l'ohm international, conservé avec sa valeur moyenne actuelle; que le système Giorgi (plus spécialement le système définitif pour lequel Giorgi présente des alternatives) devrait être adopté par le Comité international comme le système fondamental; et que ce système fondamental devrait également être préféré comme système pratique du commerce, de l'industrie et de la science.

C'est pourquoi j'insiste respectueusement pour que la proposition Giorgi de système M. K. S. comprenant l'ohm moyen international soit très soigneusement examinée par le Comité consultatif, avant que celui-ci fasse ses recommandations finales.

Bell Telephone Laboratories, New-York, 17 septembre 1935.

ANNEXE E16.

LETTRE

du Dr-Ing. FRITZ EMDE,
Professeur à la Techn. Hochschule de Stuttgart.

au Comité consultatif d'Électricité.

M. le professeur Giorgi de Rome, m'a envoyé son memorandum du 10 septembre, et m'a demandé d'écrire au Comité consultatif quel changement des unités électriques me paraît recommandable. C'est à ce désir que je répondrai ici.

Si l'on diminue la valeur de l'ohm de plus de 10^{-4} , on devra rectifier les résultats des nombreuses mesures faites avec les résistances de précision qui sont à la disposition des laboratoires. Cela implique la dépréciation d'un capital non négligeable, celui que représente chaque étalon de résistance. Par quel avantage sera contre-balancé cet inconvénient ?

Quand, il y a un demi-siècle, on introduisit les unités aujourd'hui en usage, on considérait les unités électromagnétiques absolues comme un idéal théorique, dont on voulait se rapprocher autant que possible. Il est regrettable que Heaviside soit venu une année trop tard avec sa critique de la présence du facteur 4π (*Electrician*, nov. 1882; *El.*, pap. 1, p. 199). Autrement on aurait eu au moins la pensée attirée sur ce point. Si exacte que fût la pensée d'Heaviside, elle n'atteignait pourtant pas l'essentiel de la chose, selon les conceptions actuelles. Le point de vue décisif est déjà exprimé par Maxwell dans l'article 623 de son manuel, malheureusement sans avoir été traité à fond : on a besoin d'une quatrième unité indépendante. Autrement dit : on doit mesurer exactement la constante du vide dans une unité préalablement fixée, et non pas modifier sans cesse les unités, jusqu'à ce qu'on obtienne pour cette constante du vide une

valeur qui soit prescrite d'avance. Quand des grandeurs physiques se présentent sous la forme du produit d'une valeur numérique et d'une unité de mesure, la valeur numérique doit être le facteur modifiable, et l'unité de mesure doit être le facteur invariable, et non pas l'inverse. La plus grande vertu d'une unité est sa constance absolue.

On doit songer tout spécialement aujourd'hui qu'il y a 50 ans presque personne n'était conscient de ce que l'introduction des unités absolues prescrivait implicitement qu'on assignait arbitrairement une valeur numérique déterminée à la constante du vide. On croyait qu'il existait un ohm « le plus exact ».

Aujourd'hui nous sommes éclairés là-dessus : à cette époque on avait pris par erreur une stipulation arbitraire pour un postulat nécessaire. Au lieu de dire : « on a besoin d'une quatrième unité indépendante », on peut tout aussi bien dire : « Toutes les unités de résistance ont un fondement théorique équivalent ».

Si l'on rapproche l'ohm de l'unité de résistance « absolue » d'un demi-millième — en fait on ignore vraiment si l'on atteint parfaitement l'unité « absolue » de résistance —, on ne rendra certainement aucun service à la science et à la théorie. Au contraire : on ne fait que favoriser ainsi la prolongation éternelle d'un préjugé depuis longtemps reconnu faux.

Quel autre avantage compenserait alors le grave inconvénient pratique qu'aurait la diminution de l'ohm ?

Ces considérations me forcent à reconnaître que la proposition du professeur Giorgi est la meilleure que l'on puisse faire actuellement.

Stuttgart, 21 septembre 1935.

ANNEXE E17.

SUR

LA DÉFINITION DE LA QUATRIÈME UNITÉ

NÉCESSAIRE

POUR COMPLÉTER LE SYSTÈME DES UNITÉS M. K. S.

POINTS DE VUE

Du Prof. EDWARD BENNETT.

Premier point. — Je suis d'avis de définir la quatrième unité nécessaire pour compléter le système M. K. S. des unités mécaniques, électriques et magnétiques par la méthode qui assignerait une valeur numérique à la constante de proportionnalité, qui apparaît dans l'une des formules de force servant à déduire les unités électriques et magnétiques des unités mécaniques.

Deuxième point. — Je suis d'avis d'attribuer à la constante de proportionnalité choisie une valeur telle que les unités de puissance, d'intensité de courant, de force électromotrice, de résistance, etc., dans le système M. K. S. complet soient le watt, l'ampère, le volt, l'ohm, etc., absolus pratiques, et non le watt, l'ampère, l'ohm, etc., internationaux.

Troisième point. — Je suis d'avis de définir la perméabilité (magnétique) et la permittivité (électrique) du vide de façon à libérer des facteurs irrationnels 4π les formules les plus fréquemment usitées.

Cette rationalisation des formules peut être accomplie, sans utiliser les *unités rationalisées* de Heaviside pour l'intensité de courant, la force électromotrice, la résistance, etc., par deux artifices très simples; savoir :

a. En utilisant comme unités de force magnétomotrice et d'intensité magnétique, l'*ampère-tour* et l'*ampère-tour par centimètre*, au lieu du gilbert et du gilbert par centimètre.

b. En marquant une distinction entre la *constante diélectrique* k et la permittivité p d'un diélectrique. La permittivité est reliée à la constante diélectrique par l'équation de définition $p = \frac{k}{4\pi}$. La constante diélectrique est éliminée et le pouvoir inducteur est utilisé dans toutes les équations.

Quatrième point. — Conformément au choix préconisé dans le premier, deuxième et troisième points, je suis d'avis de définir le facteur de proportionnalité μ_0 (perméabilité magnétique du vide) dans le système M. K. S., en lui assignant la valeur numérique suivante, arbitrairement choisie.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256637 \cdot 10^{-6}.$$

Dans le système M. K. S., où la perméabilité est définie comme il vient d'être dit, la permittivité du vide p_0 est une constante de proportionnalité dont la valeur numérique est à déterminer par l'expérience. Sa valeur ressort à

$$p_0 = \frac{10^7}{4\pi s^2},$$

s représentant la vitesse de la lumière dans le vide en mètres par seconde.

En utilisant la valeur

$$s = 3(1 - 0,00068 \pm 0,00002) \cdot 10^8 \text{ m/sec,}$$

$$p_0 = (8,8540 \pm 0,0003) \cdot 10^{-12}.$$

Cinquième point. — En tant que professeur, chargé de présenter l'enchaînement rigoureux des relations électriques et magnétiques, j'enseignerai et j'écrirai, *en vue d'exposer les relations de la façon la plus claire* :

« Assigner à μ_0 la valeur numérique $1,256637 \cdot 10^{-6}$, c'est-à-dire
 » faire de p_0 une constante de proportionnalité, dont la valeur
 » est à déterminer expérimentalement,

équivalent à :

» assigner à p_0 la valeur numérique $8,8540 \cdot 10^{-12}$, c'est-à-dire
 » faire de μ_0 la constante de proportionnalité déterminée expé-
 » rimentalement. »

Je continuerai alors à exposer les relations dans l'ordre où les formules rationalisées comprenant p_0 et μ_0 sont écrites dans le Tableau suivant.

Sixième point. — L'un des principes les plus importants qui devraient régler l'appellation des unités, dans un système cohérent d'unités à usage universel, est le suivant :

PRINCIPE. — *Désigner les unités des formules par des noms non composés* (ou Principe de dérivation uniforme des expressions des unités de l'atelier, du laboratoire et du commerce à partir des unités des formules), respecter toujours le principe suivant lequel « en formant le nom d'une unité industrielle, scientifique ou commerciale, un préfixe décimal donné, tel que « kilo », devra toujours désigner le même multiple de l'unité de la formule » ; c'est dire qu'il n'est pas admissible d'alourdir le nom des unités des formules par des préfixes décimaux trompeurs.

Dans le système M. K. S., la seule unité des formules qui soit alourdie d'un préfixe trompeur est le « kilogramme ». C'est, à mon avis, une tare sérieuse. Puisqu'on peut y remédier par l'expédient relativement simple, consistant à éliminer l'appellation kilogramme et à lui substituer le terme « kam », je préconise vivement une décision à ce sujet. Le gramme actuel deviendrait un « millikam » et le « milligramme » un « microkam » (1).

(1) Voir page 2 de l'article *Comprehensive Systems of units of Universal use*, par Edward Bennett, discutant une communication de A. E. Kennelly sur les unités de circuit magnétique (*Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, avril 1930).

TABLEAU

Quelques formules rationalisées comprenant p_0 et μ_0 et indiquant l'ordre dans lequel les relations doivent être exposées.

(Les symboles sont définis dans une liste placée en fin de Tableau.)

— Force entre charges ponctuelles (définition du coulomb) :

$$f(\text{dyne} \times 10^5, \text{ ou galeos}) = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi p_0 l^2} \begin{matrix} (\text{coulombs}) \\ (\text{mètres}) \end{matrix}$$

dans laquelle, par définition,

$$p_0 = 8,8540 \cdot 10^{-12}.$$

— Intensité (du champ) due à une charge ponctuelle :

$$F(\text{galeos par coulomb ou volts par mètre}) = \frac{q}{4\pi p_0 l^2} \begin{matrix} (\text{coulombs}) \\ (\text{mètres}) \end{matrix}$$

— Force sur une surface chargée (pression) :

$$f(\text{galeos par mètre carré}) = \frac{\sigma^2}{2p_0} (\text{coulombs par mètre carré}).$$

— Permittance ou capacité d'un cylindre droit :

$$\sigma(\text{farads}) = \frac{p_0 a}{l}.$$

— Définition du déplacement d'électricité :

$$D(\text{coulombs par mètre carré}) = p_0 F \text{ volts par mètre.}$$

— Densité volumique d'énergie :

$$\omega(\text{joules par mètre cube}) = \frac{p_0 F^2}{2} = \frac{D^2}{2p_0}.$$

— Définition du courant :

$$I(\text{ampères}) = \frac{dq}{dt} \begin{matrix} (\text{coulombs}) \\ (\text{secondes}) \end{matrix}.$$

— Définition de la densité du flux magnétique en fonction de la force exercée sur un fil rectiligne d'un « explorateur de champ » de longueur l et parcouru par un courant d'épreuve I :

$$\vec{B}(\text{webers par mètre carré}) = \frac{\vec{f}}{I \cdot l \cdot \sin(B, l)} \begin{matrix} (\text{galeos}) \\ (\text{ampère, mètre}). \end{matrix}$$

— Définition de la constante de proportionnalité μ_0 , au moyen de la formule d'Ampère :

$$dB(\text{webers par mètre carré}) = \frac{\mu_0 I \sin(r, l) dl}{4\pi r^2}.$$

D'après les mesures expérimentales :

$$\mu_0 = 1,2566 \times 10^{-6} \rightarrow 4\pi \cdot 10^{-7} \rightarrow \frac{1}{p_0 s^2}.$$

— Définition de l'intensité de champ magnétique :

$$dH(\text{ampères-tours par mètre}) = \frac{I \sin(r, l) dl}{4\pi r^2},$$

$B(\text{webers par mètre carré}) = \mu_0 H(\text{ampères-tours par mètre}).$

— Densité volumique d'énergie :

$$\omega(\text{joule par mètre cube}) = \mu_0 \frac{H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0}.$$

— Perméance d'un cylindre droit :

$$\mathcal{P}(\text{webers par ampère-tour}) = \frac{\mu_0 \sigma}{l}.$$

— Force exercée entre des fils rectilignes parallèles :

$$f(\text{galeos}) = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi r}.$$

— Force entre pôles magnétiques très éloignés :

$$f(\text{galeos}) = \frac{m_1 m_2}{4\pi \mu_0 l^2} \begin{matrix} (\text{webers}) \\ (\text{mètres}) \end{matrix}.$$

— Équations de Maxwell (dans le vide) :

$$\text{div. } F = \frac{\rho}{p_0},$$

$$\text{div. } B = 0,$$

$$\text{curl } F = -\frac{dB}{dt},$$

$$\text{curl } B = \mu_0 \left(\gamma F + p_0 \frac{dF}{dt} \right).$$

Définitions des symboles.

a , désigne une surface, en mètres carrés;

l , une longueur, en mètres;

f , une force, en dynes $\times 10^9$ ou *galeos* = 10^9 dynes (le nom de *galeo* pour l'unité de force est proposé pour commémorer les observations décisives de Galilée sur le mouvement des corps);

q , une quantité d'électricité, en coulombs;

σ , la densité superficielle d'électricité, en coulombs par mètre carré.

ρ , la densité volumique d'électricité, en coulombs par mètre cube.

F , l'intensité de champ électrique, en volts par mètre;

D , la densité de flux électrostatique, ou déplacement électrique, en coulombs par mètre carré;

C , la capacité, en farads ou coulombs par volt;

ω , la densité volumique d'énergie, en joules par mètre cube;

I , l'intensité de courant, en ampères;

B , la densité de flux magnétique, en webers par mètre carré;

H , l'intensité magnétique, en ampères-tours par mètre;

\mathcal{P} , la perméance magnétique, en webers par ampère-tour;

m , la force d'un pôle magnétique, en webers;

s , la vitesse de la lumière, en mètres par seconde;

p_0 , la permittivité du vide, en coulombs par mètre carré, par volt et par mètre. Par définition,

$$p_0 = 8,8540 \times 10^{-12};$$

μ_0 , la perméabilité du vide, en webers par mètre carré, par ampère-tour et par mètre.

γ , la conductibilité, en mho par mètre.

5 septembre 1935.

ANNEXE E18.

REMARQUES
SUR
LE SYSTÈME D'UNITÉS GIORGI

Par M. J. WALLOT,

Président de l'A. E. F. (Ausschusz für Einheiten und Formelgrößen).

Les considérations suivantes sont basées sur la supposition que la « perméabilité du vide » μ_0 , ainsi qu'en a décidé la C. E. I. à Oslo (1930), est une *grandeur physique* qui a une dimension définie, bien que nous soyons naturellement autorisés à faire sa valeur numérique égale à l'unité, en la rapportant à elle-même comme unité.

Au cours des discussions qui ont eu lieu à Scheveningen et en lisant les remarques diverses publiées sur le système Giorgi, j'ai eu l'impression que les différences existant entre les opinions dérivent essentiellement d'une certaine confusion sur le sens de quelques termes techniques utilisés dans les discussions. Je suis d'avis que les deux notions :

Étalon fondamental (Urmass, fundamental standard),
Unité fondamentale (Grundeinheit, fundamental unit),

qui devraient être strictement distinguées l'une de l'autre, ont été fréquemment confondues.

Ce n'est pas l'unité à choisir comme quatrième unité fondamentale dans le système Giorgi qui est le point réellement en question; nous avons à répondre aux deux questions suivantes :

1° Sur quels *étalons* fondamentaux le système Giorgi doit-il être basé?

2° Quelles sont les quatre unités à choisir, pour constituer les quatre *unités* fondamentales du système Giorgi?

A mon avis, il n'est pas difficile d'arriver à un accord, si, dans toutes nos discussions, nous faisons la discrimination rigoureuse entre ces deux questions.

La réponse à la *première question*, savoir, sur quels *étalons* fondamentaux le système Giorgi doit être basé, ne présente aucune difficulté en ce qui concerne *trois* des quatre étalons fondamentaux, puisque les opinions ne diffèrent pas en ce qui concerne le mètre et le kilogramme, fondamentaux et concrets, et la « seconde » dérivée du mouvement de la terre.

Le choix du quatrième étalon fondamental peut, au contraire, être considéré comme difficile à certains égards. Les difficultés disparaîtront si l'on se rend compte que le choix du quatrième étalon peut dépendre *uniquement* de considérations concernant la technique des mesures précises. Les étalons fondamentaux doivent être, avant tout, exactement définis. Il n'y a que très peu d'étalons réellement parfaits; et seul un physicien qui a pratiqué longuement les mesures les plus précises a une autorité pour choisir, parmi ces quelques étalons fondamentaux, ceux qui peuvent être utilisés avec le maximum d'avantages, c'est-à-dire ceux qui représentent quelque chose de réellement défini. En d'autres termes, en ce qui concerne la première question, nous devons nous soumettre au jugement des physiciens de précision sans aucune réserve.

Or, ces physiciens de précision, c'est-à-dire la Huitième Conférence générale des Poids et Mesures, se sont formellement prononcés il y a deux ans sur l'introduction des unités *absolues* électriques. Comme on ne peut admettre que l'on revienne sur cette décision pour l'annuler, il est, je crois, inutile de discuter la première question, puisqu'elle a déjà été tranchée. Je suis heureux de dire que Sir R. T. Glazebrook (dans son memorandum) et M. Abraham ont, eux aussi, très positivement soutenu le maintien de cette décision.

Des doutes se sont cependant élevés sur le fait de savoir si l'adoption des unités absolues introduirait réellement un quatrième étalon fondamental; et s'il en était ainsi, quel serait cet étalon?

Ces doutes peuvent cependant être levés immédiatement. Ceux qui sont d'avis que μ_0 n'est rien d'autre que le chiffre 1, sont

certainement autorisés à nier qu'un quatrième étalon fondamental soit ajouté au mètre, au kilogramme et à la seconde. Au contraire, si nous sommes convaincus que μ_0 est une grandeur physique, nous devons considérer celle-ci comme le quatrième étalon fondamental. Toute discussion sur le quatrième étalon fondamental sera alors inutile; car, tout ce qui pourrait être dit à ce sujet, résulte nécessairement des règles généralement adoptées pour l'étalonnage exact des étalons électriques de travail.

Quand M. Campbell et M. Giorgi soutenaient récemment l'adoption d'un étalon fondamental concret de résistance ou d'inductance, ils croyaient probablement que la décision de la Huitième Conférence générale pouvait être révoquée. Dans ce cas, ils sous-estimeraient l'autorité de la Conférence. Mais, même si cette décision était révocable, nous nous en remettrions aux experts des grands Laboratoires nationaux; suivant l'expérience de ces derniers, de tels étalons concrets fondamentaux de résistance et d'inductance ne seraient pas suffisamment invariables.

Cette expérience n'empêche pas sans doute d'employer les résistances et inductances de précision comme étalons de travail de haute qualité. Une grande partie des avantages préconisés par M. Campbell deviendraient alors réels. Mais ces étalons seraient des étalons de travail plutôt que des étalons fondamentaux et devraient être étalonnés de temps en temps de manière absolue.

La seconde question n'a pas grand'chose à voir avec la première. A partir de quatre étalons fondamentaux définis, on peut établir un système d'unités défini, d'après une définition de système définie (par exemple suivant le principe de cohérence), avec l'aide de quatre facteurs numériques admis. Par suite, un système d'unités est fourni par l'indication 1^o de quatre étalons fondamentaux, 2^o de quatre facteurs numériques (qui peuvent même être le chiffre 1) et 3^o des principes suivant lesquels le système a été construit (par exemple écriture rationnelle, cohérence).

Suivant l'opinion de M. Giorgi, son système doit être basé sur le mètre, le kilogramme, la seconde, et sur un étalon concret fondamental de résistance, dont la valeur serait rendue égale à l'ohm international, avec la plus haute précision possible. Mais, comme nous l'avons vu, la Conférence générale n'a pas adopté l'ohm international comme quatrième étalon fondamental.

*Les résistances étalons, ainsi que les éléments étalons, seront, dans l'avenir, étalonnés en valeur absolue, par exemple au moyen de la machine de Lorenz ou de la balance de courant de Rayleigh.

Dans ce qui suit, je supposerai donc, contrairement à l'idée de son auteur, que le système Giorgi est basé sur les étalons fondamentaux suivants :

le mètre concret,
le kilogramme concret,
la seconde } comme étalons non concrets,
 μ_0

Des systèmes innombrables d'unités peuvent être sans doute échafaudés sur la base de ces quatre étalons fondamentaux. Pour obtenir le système Giorgi, nous devons fixer, avec l'aide de quatre facteurs numériques définis, quatre unités indépendantes ou fondamentales, et déduire toutes les autres unités de celles-ci, suivant le principe de cohérence. (La question de rationalisation doit être laissée en dehors de la discussion.)

Il est sans importance de savoir quelles sont les quatre unités fondamentales, dérivées des quatre étalons fondamentaux avec l'aide des quatre facteurs numériques.

Si nous adoptons la forme rationnelle, en posant

$$4\pi \cdot 10^{-7} = \alpha^2$$

(avec la forme non rationnelle, α^2 serait égal à 10^{-7}), nous pourrions prendre par exemple :

(Possibilité 1), les unités

1. m 1. kg 1. s $\frac{\mu_0}{\alpha^2}$

ou, ce qui serait la même chose,

m kg s henry/m

comme unités fondamentales; cette possibilité est identique à la possibilité 1 indiquée à la page 312 du mémorandum de Sir R. T. Glazebrook. Suivant le principe de cohérence, nous obtenons alors automatiquement le système Giorgi, qui comprend, entre autres, les unités ampère, coulomb, volt, ohm, siemens, watt, joule, weber, farad, henry.

Le système Giorgi est également obtenu par le choix des unités fondamentales suivantes :

(Possibilité 2),

$$1. \text{ m} \quad 1. \text{ kg} \quad 1. \text{ s} \quad \frac{\text{m } \mu_0}{\alpha^2 \text{ s}}$$

ou, ce qui est la même chose,

$$\text{m} \quad \text{kg} \quad \text{s} \quad \text{ohm.}$$

(Possibilité 3, identique à la possibilité 2 indiquée à la page 312 du mémorandum)

$$1. \text{ m} \quad 1. \text{ kg} \quad 1. \text{ s} \quad \alpha \sqrt{\frac{\text{m kg}}{\mu_0}}$$

ou, ce qui est la même chose,

$$\text{m} \quad \text{kg} \quad \text{s} \quad \text{coulomb.}$$

(Possibilité 4),

$$1. \text{ m} \quad \alpha \sqrt{\frac{\text{m kg}}{\mu_0}} \quad 1. \text{ s} \quad \frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{ kg } \mu_0}}{\alpha \text{ s}^2}$$

ou, ce qui est la même chose,

$$\text{m} \quad \text{Ampère} \quad \text{s} \quad \text{volt.}$$

(Possibilité 5, Kalantaroff),

$$1. \text{ m} \quad \alpha \sqrt{\frac{\text{m kg}}{\mu_0}} \quad 1. \text{ s} \quad \frac{\sqrt{\text{m}^3 \text{ kg } \mu_0}}{\alpha \text{ s}}$$

ou, ce qui est la même chose,

$$\text{m} \quad \text{coulomb} \quad \text{s} \quad \text{weber.}$$

Ainsi, nous pouvons prendre quatre unités fondamentales quelconques. Le système obtenu est toujours le système Giorgi, il contient *toujours les mêmes* unités, et il est toujours basé sur les quatre étalons fondamentaux m, kg, s, μ_0 .

C'est pour cela qu'en accord avec le délégué autrichien, j'ai suggéré à Scheveningen de ne trancher pour le moment la question des unités fondamentales, qu'en ce qui concerne le mètre

et la « seconde » pris comme *unités* fondamentales. L'établissement des deux autres unités fondamentales serait trop difficile à l'heure actuelle.

A Scheveningen, on a objecté que, bien que le système Giorgi demeure le même, quelles que soient les unités fondamentales choisies, il a toujours été d'usage de caractériser les systèmes par leurs unités fondamentales, et qu'il ne faudra pas abandonner cet usage dans le cas du système Giorgi.

Ce motif semble assez évident. Malheureusement, toutes les discussions récentes ont montré qu'il est difficile d'arriver à un accord sur la question des unités fondamentales, pour la raison même qu'*aucun* choix, quel qu'il soit, ne peut être entièrement satisfaisant pour *tous* les buts. Le choix du kilogramme comme l'une des unités fondamentales conduirait à des difficultés en électricité, bien qu'il soit d'un emploi très commode en mécanique.

Dans la théorie de l'électricité, nous obtenons, pour la possibilité 1 ci-dessus :

$$\text{ampère} = \text{m}^{1/2} \text{kg}^{1/2} \text{s}^{-1} \left(\frac{\text{H}}{\text{m}}\right)^{-1/2},$$

$$\text{volt} = \text{m}^{3/2} \text{kg}^{1/2} \text{s}^{-2} \left(\frac{\text{H}}{\text{m}}\right)^{1/2};$$

pour la possibilité 2 :

$$\text{ampère} = \text{m kg}^{1/2} \text{s}^{-3/2} \Omega^{-1/2},$$

$$\text{volt} = \text{m kg}^{1/2} \text{s}^{-3/2} \Omega^{1/2};$$

pour la possibilité 3 :

$$\text{ampère} = \text{s}^{-1} \text{C},$$

$$\text{volt} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{C}^{-1},$$

$$\text{ohm} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-1} \text{C}^{-2},$$

alors que, en mécanique, la possibilité 4 se traduit par

$$\text{kg} = \text{m}^{-2} \Lambda \text{s}^3 \text{V},$$

et la possibilité 5 par

$$\text{kg} = \text{m}^{-2} \text{Cs Wb}.$$

On doit noter que précisément les possibilités 1 et 2, qui

ont jusqu'ici été préférées — cela est dû probablement à la confusion des deux notions d'étalon fondamental et d'unité fondamentale —, conduisent aux combinaisons les plus fâcheuses.

Il est possible d'aller encore plus loin et de demander : quelle est l'utilité de choisir des unités fondamentales définies ? A l'exception de domaines spéciaux (par exemple la théorie de la similitude), personne n'emploie des combinaisons telles que

$$m^{-2} A s^2 V$$

pour le kilogramme; même si, en électricité, nous comptons en ampères et en volts, nous préférons employer le symbole kg pour l'unité de masse, plutôt que le symbole $m^{-2} A s^2 V$, si des problèmes mécaniques se posent. Nous avons besoin de formules telles que $H = \Omega s$, $F = s/\Omega$, etc. Mais personne n'a jamais appris par cœur des combinaisons telles que

$$m \text{ kg}^{1/2} s^{-3/2} \Omega^{-1/2};$$

celles-ci ont une existence contemplative uniquement dans certains chapitres de manuels qui sont lus rarement et avec une certaine répugnance.

Il reste maintenant à répondre à la question de savoir s'il serait, malgré tout, recommandable de fixer quatre unités fondamentales *déterminées*, au moins pour nous permettre de désigner brièvement le système Giorgi. Si le symbole M. K. S. est compris comme signifiant seulement que le mètre, le kilogramme et la seconde appartiennent au système, en plus de bien d'autres unités, il peut être accepté. Si, cependant, l'on est d'avis que les lettres M. K. S. sont là pour indiquer les unités *fondamentales*, on choisira nécessairement l'une des trois possibilités 1, 2 et 3; les possibilités 4 et 5 (et autres) seraient éliminées sans plus ample examen. La désignation M. K. S., naturellement, ne doit pas s'appliquer aux *étalons* fondamentaux, puisque les unités électromagnétiques C. G. S. également sont basées sur les *étalons* fondamentaux m, kg, s, μ_0 .

Je suis heureux qu'à Scheveningen la désignation « Système M. K. S. » ait été abrogée et remplacée par le nom « Système Giorgi », qui est non seulement meilleur, mais permet aussi d'exprimer la gratitude et de rendre l'hommage que nous devons à M. Giorgi, l'éminent auteur du système.

En ce qui concerne la résolution de M. Abraham, à la page 315

du mémorandum, je ne suis pas assez compétent pour apprécier l'exactitude de ses arguments. Toutefois, je suis d'accord avec M. Abraham sur le fait qu'aujourd'hui nous ne pouvons que revenir aux définitions originales des unités électriques du système pratique, suivant lesquelles ces unités sont des multiples décimaux exacts des unités du système électromagnétique C. G. S.

Berlin-Charlottenbourg, 18 septembre 1935.

ANNEXE E19.

LETTRE

du Prof. A. SOMMERFELD,

à M. le PRÉSIDENT

du Comité Consultatif d'Électricité.

Le professeur G. Giorgi m'a prié de vous informer que, dans la question actuelle des unités, je représente le même point de vue que M. Giorgi lui-même. La question a été agitée, il y a peu de jours, à Stuttgart, lors de la réunion de la Société de Physique, en combinaison avec un rapport de moi-même sur la nécessité d'employer quatre unités indépendantes dans l'électrodynamique. Je me réjouis infiniment de ce que cette nécessité ait été reconnue par un groupement autorisé de la C. E. I. Mais il me semble, ainsi qu'à la plupart de mes collègues, que l'on doit utiliser la liberté qui nous a été donnée par là : l'unité de résistance peut être choisie d'après des points de vue pratiques, et elle n'a pas besoin d'être égale à 10^9 unités C. G. S. Cette opinion a été représentée vigoureusement à Stuttgart par MM. Pohl (Göttingen), Emde (Stuttgart), et par beaucoup d'autres. Du point de vue des théoriciens, j'ai exprimé cette opinion déjà dans les écrits du Jubilé de Zeeman; je vous envoie une copie de mon article d'alors. Je dois naturellement laisser aux autorités de la technique des mesures les questions pratiques; je me permets cependant d'ajouter que, pour moi, les points de vue de M. Giorgi, dans son memorandum du 10 septembre, sont convaincants.

Université de Munich, 31 septembre 1935.
