



HAL
open science

Mesure en valeur absolue des périodes des oscillations électriques de haute fréquence

Henri Abraham, Eugène Bloch

► **To cite this version:**

Henri Abraham, Eugène Bloch. Mesure en valeur absolue des périodes des oscillations électriques de haute fréquence. *J. Phys. Theor. Appl.*, 1919, 9 (1), pp.211-222. 10.1051/jphystap:019190090021100 . jpa-00242012

HAL Id: jpa-00242012

<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00242012>

Submitted on 1 Jan 1919

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MESURE EN VALEUR ABSOLUE DES PÉRIODES DES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES DE HAUTE FRÉQUENCE ;

PAR MM. HENRI ABRAHAM et EUGÈNE BLOCH.

I. La mesure des longueurs d'onde en télégraphie sans fil. — La détermination des longueurs d'onde est à la base de toutes les mesures faites en haute fréquence. La plupart de ces mesures se font, en pratique, au moyen des *ondemètres* ou *contrôleurs d'onde*, qui contiennent un circuit oscillant à capacité ou à self réglable. L'organe réglable est muni d'une graduation sur laquelle on peut lire directement la longueur d'onde des oscillations propres du circuit. Si l'on connaissait exactement les valeurs de la self et de la capacité on pourrait calculer immédiatement les longueurs d'onde, et la graduation de l'ondemètre se ferait directement en valeur absolue. Il suffirait, en effet, d'appliquer la formule de Thomson :

$$\lambda = 2\pi \sqrt{CL},$$

qui donne la longueur d'onde en centimètres lorsque C et L représentent la capacité et la self évaluées respectivement en unités C.G.S. électrostatiques et en unités C. G. S. électromagnétiques.

Malheureusement les valeurs de C et de L ne peuvent être déterminées que d'une manière indirecte par comparaison avec des étalons de capacité et de self, et l'étalonnage est alors entaché à la fois des incertitudes possibles sur les valeurs réelles des étalons, et des erreurs inévitables des comparaisons intermédiaires.

L'expérience a montré en effet que cette méthode, seule employée jusqu'à ces derniers temps, était devenue d'une précision insuffisante pour les nécessités de la pratique. Il n'était pas rare de constater, par exemple, des écarts de trois ou quatre pour cent entre les indications de deux ondemètres étalonnés indépendamment par des établissements scientifiques en Angleterre, aux États-Unis ou en France.

Ce degré de précision n'est plus acceptable maintenant. Les progrès constants de la technique, l'emploi de plus en plus intensif des ondes entretenues et des résonances très aiguës, font du réglage d'un poste de T. S. F. une opération de précision dans laquelle il importe que les longueurs d'ondes soient définies à moins de un

pour cent près. Aussi était-il devenu urgent d'étudier des méthodes plus sûres pour étalonner en valeur absolue les ondemètres qui sont conservés comme étalons secondaires pour les comparaisons des instruments d'usage courant.

Le présent travail a pour objet de décrire la méthode que nous avons proposée pour atteindre ce but. La précision des résultats atteint aisément le millième, et c'est cette méthode qui est actuellement adoptée pour les mesures internationales de T. S. F. ⁽¹⁾.

II. Principe de la méthode. — La longueur d'onde étant liée à la période par la formule fondamentale :

$$\lambda = VT,$$

où V représente la vitesse des ondes, égale à 2.999. 10¹⁰ C. G. S., la détermination des longueurs d'onde est équivalente à celle des fréquences ou des périodes : c'est de la mesure absolue de ces périodes d'oscillations que nous nous occuperons ici.

La méthode actuelle est fondée sur l'utilisation des harmoniques.

Supposons qu'un alternateur ou un oscillateur de fréquence voisine de 1.000 périodes, et facile à déterminer par comparaison avec un diapason étalon, produise des courants périodiques extrêmement riches en harmoniques de rangs élevés. Le centième de ces harmoniques sera une oscillation de haute fréquence, puisqu'il fera 100.000 vibrations par seconde, et sa longueur d'onde sera de 3 kilomètres. Pour étalonner un ondemètre sur cette longueur d'onde de 3 kilomètres, il suffira donc de le mettre en résonance sur le 100^e harmonique du vibreur.

Nous avons été conduits à mettre au point cette méthode de mesure au cours des années 1916 et 1917, en recherchant les causes de certaines anomalies des amplificateurs à lampes de la radiotélégraphie militaire. Nous avons en effet constaté dans ces appareils des décharges intermittentes. En exagérant l'une des causes de ce phénomène, nous avons été amenés à construire un appareil spécial à deux lampes amplificatrices, dont le fonctionnement se réduisait exclusivement à la production de décharges périodiques de fré-

(1) Les résultats, consignés dans diverses Notes en 1916 et 1917, ont été publiés brièvement aux *Comptes Rendus* (séance du 2 juin 1919) et communiqués à la Société de Physique (séance du 4 juillet 1919). Leur exposé détaillé a paru dans un mémoire publié aux *Annales de Physique*.

quence musicale, ayant une richesse en harmoniques vraiment extraordinaire, puisqu'elle allait jusqu'à ceux de rang 200 ou 300. Nous avons donné à cet appareil le nom de *multivibrateur*, qui rappelle cette remarquable propriété.

D'après ce que nous venons de voir, la mise en œuvre de la méthode actuelle doit comporter deux opérations préliminaires :

A. — Étalonner un diapason à mille périodes par comparaison avec les secondes de l'horloge astronomique.

B. — Construire un *multivibrateur*, ou un autre oscillateur riche en harmoniques de rangs élevés.

La mesure proprement dite comprendra ensuite deux autres opérations :

C. — Accorder la fréquence fondamentale du multivibrateur à l'unisson du diapason étalon.

D. — Comparer enfin par résonance la fréquence de divers harmoniques de rangs connus avec la fréquence des vibrations propres du circuit oscillant qu'il s'agit d'étalonner.

Voici maintenant quelques indications sur les dispositifs que nous avons utilisés pour chacune de ces quatre opérations.

III. **Étalonnement du diapason.** — *Premier procédé.* — Sur un enregistreur photographique multiple de Dufour, on inscrit les battements de l'horloge en même temps que les vibrations d'un diapason auxiliaire, à 100 périodes, entretenu électriquement. Le courant d'entretien du diapason excite d'autre part un circuit oscillant à self réglable que l'on met en résonance sur l'harmonique 10 de la fréquence du diapason. Ce circuit oscillant actionne à son tour un récepteur téléphonique en produisant un son de 1.000 périodes, et l'on fait battre le son ainsi obtenu avec celui que produit le diapason à 1.000 périodes que l'on veut étalonner : ces battements sont inscrits, eux-mêmes, sur la bande photographique, par la manœuvre d'un manipulateur. On a ainsi tous les éléments nécessaires pour la comparaison de la fréquence du diapason à mille périodes avec les secondes de l'horloge.

Second procédé. — L'étalonnement a été contrôlé par un procédé stroboscopique. Le son à 1.000 périodes, qui devait battre avec le diapason étudié, était produit, cette fois, par un tout petit alternateur à fer tournant produisant 40 périodes par tour et faisant 25 tours par seconde. On s'assurait de l'exactitude rigoureuse de la

vitesse de rotation en éclairant instantanément le moteur, à chaque seconde, par l'étincelle condensée d'une bobine de Ruhmkorff, manœuvrée par un relais, actionné lui-même par des interruptions de courant produites par le balancier de l'horloge.

Troisième procédé. — Enfin M. Bull a bien voulu procéder, à l'Institut Marey, à l'inscription *directe* sur film cinématographique des vibrations mêmes du diapason, fortement grossies par un objectif de microscope. L'enregistrement simultané de la seconde lui donnait alors, sans aucun intermédiaire, la mesure de la fréquence.

Ces trois procédés, appliqués à un même diapason, ont donné des résultats bien concordants. Les écarts n'ont pas dépassé *un dix-millième* de la valeur de la période.

IV. Réalisation du multivibrateur. — L'appareil consiste en un groupe de deux lampes amplificatrices du modèle courant de la

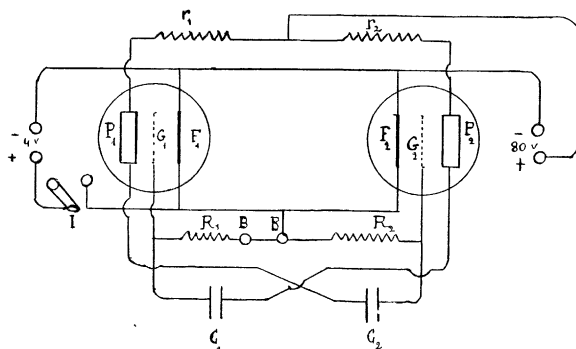


FIG. 1.

radiotélégraphie militaire, couplées à la fois par capacités et par résistances, conformément au schéma de la *fig. 1*. Les filaments F_1 et F_2 des lampes 1 et 2 sont chauffés en parallèle par une batterie de 4 volts munie de l'interrupteur d'allumage I. Chacune des plaques P_1 , P_2 est reliée à la grille G_2 ou G_1 de l'autre lampe par l'un des condensateurs C_1 ou C_2 , tous deux réglables d'abord par sections fixes, puis par variations continues. Les grilles G_1 , G_2 sont aussi en communication, par l'intermédiaire des résistances fixes R_1 , R_2 , avec le pôle positif de la batterie de chauffage. Les plaques P_1 , P_2 sont alimentées, d'autre part, à travers d'autres résistances fixes r_1 , r_2 , par le pôle positif d'une batterie de haute tension

(80 volts), dont le pôle négatif est commun avec le pôle négatif de la batterie de chauffage.

Comme nous allons le voir, dès qu'on allume les lampes, l'appareil est le siège d'oscillations électriques, dont la fréquence peut être réglée en agissant sur les condensateurs variables, et ce sont les courants fournis par cet appareil, extrêmement riches en harmoniques, qui sont utilisés pour l'observation des résonances de haute fréquence. La prise de courant se fait sur le circuit de décharge de l'une des grilles, en retirant la barrette qui relie les deux bornes marquées B et en reliant ces deux bornes à une bobine de quelques tours de fil, destinée à agir par induction sur les circuits oscillants.

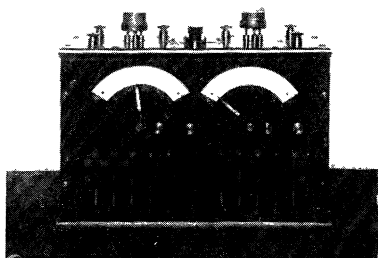


FIG. 2.

La *fig. 2* donne la vue d'ensemble des premiers appareils réalisés par la Radiotélégraphie militaire. On y voit la disposition du panneau avant formé par une planche d'ébonite sur laquelle sont fixées, à la partie inférieure, les manettes permettant de grouper en parallèles parties fixes des condensateurs $C_1 C_2$ et, à la partie supérieure, des boutons et des cadrans gradués permettant de manœuvrer et de lire les capacités variables et les cercles gradués permettant de lire leur valeur.

Les valeurs numériques des capacités et des résistances sont les suivantes :

$R_1 = R_2 = r_1 = r_2 = 50.000$ ohms, en galettes plates de fil de maillechort.

$C_1 = C_2$, formés de sections fixes de 0,5 ; 1 ; 2 ; 3 ; 4 millièmes de microfarad (mica et papier d'étain), et d'une section variable de

0,5 millième de microfarad (condensateur à air). Toutes ces sections peuvent être groupées à volonté en parallèle.

V. Fonctionnement du multivibrateur. — Sans entrer dans l'analyse détaillée des phénomènes, il est aisé de voir que la bobine placée en B doit être traversée par une série de *décharges brusques* se reproduisant périodiquement avec une fréquence qui dépend des valeurs des capacités C_1 , C_2 et des résistances de grille R_1 , R_2 : la période est de l'ordre de grandeur de la constante de temps :

$$t = C_1 R_1 + C_2 R_2,$$

c'est-à-dire de l'ordre du millième de seconde, d'après les valeurs adoptées pour les capacités et les résistances.

Nous allons montrer en effet que le fonctionnement de l'appareil est nécessairement intermittent. A un moment quelconque, l'un des deux circuits de plaque ne débite aucun courant, parce que la grille correspondante est négative, et, pendant ce temps, l'autre plaque débite, parce que sa grille est positive ; puis, brusquement, les deux lampes changent de rôle. La grille qui était négative ne peut pas, en effet, le rester toujours. Cette grille, avec la capacité C qui lui est reliée, se décharge progressivement à travers la résistance R correspondante, et elle tend à remonter ainsi jusqu'au potentiel du pôle positif de la batterie de chauffage. Dès que cette grille devient positive⁽¹⁾, la plaque correspondante se met à débiter en même temps que l'autre. Mais nous verrons dans un moment que ce régime est tout à fait instable, et que la plaque qui vient de commencer à débiter passe presque instantanément à son débit maximum, pendant que le débit de l'autre plaque tombe brusquement à zéro : le rôle des deux plaques est alors inverse. Une nouvelle inversion de sens contraire se produira ensuite pour les mêmes raisons, et ces phénomènes se répéteront ainsi périodiquement sans arrêt. Nous voyons déjà pourquoi la période est de l'ordre de grandeur de $C_1 R_1 + C_2 R_2$, puisque cette période dépend de la durée de charge des capacités C_1 , puis C_2 , à travers les résistances R_1 , puis R_2 . Il nous reste à indiquer le mécanisme des inversions.

Partons d'un moment où, la plaque P_1 étant en plein débit, la plaque P_2 commence à débiter aussi. Le courant de cette plaque P_2 , qui passe dans la résistance r_2 , fait baisser le voltage de P_2 à cause

⁽¹⁾ Les potentiels sont comptés à partir du pôle négatif de la batterie de chauffage, pris comme point neutre.

de la chute de tension dans r_2 . Le condensateur C_1 transmet cette diminution de potentiel à la grille G_1 , ce qui entraîne d'abord une diminution du courant de la plaque P_1 , et, par conséquent, une élévation de potentiel par l'effet de la résistance r_1 . Cette élévation de potentiel, transmise à son tour par le condensateur C_2 , élève la tension de la grille G_2 , ce qui a pour effet d'augmenter le débit de la plaque P_2 , et, par suite, d'accélérer le changement de régime. L'inversion se poursuit ainsi rapidement, jusqu'à ce que la plaque P_2 soit à plein débit et que la plaque P_1 cesse à son tour de fournir du courant.

Ce mécanisme a pu être étudié en détails en donnant aux capacités C et aux résistances R des valeurs élevées se mesurant en microfarads et en mégohms. L'intervalle des inversions brusques est alors de *plusieurs secondes*, et l'on suit aisément les phénomènes en plaçant des instruments de mesure dans les divers circuits.

Inversement, quand on diminue les capacités et les résistances, les courants fournis par le multivibrateur augmentent de fréquence. On passe d'abord par les fréquences musicales, puis on atteint les hautes fréquences de T. S. F., mais les courants sont toujours des décharges très brusques à répétition périodique. C'est à ce caractère essentiel que le multivibrateur doit son extraordinaire richesse en harmoniques ; et il est tout à fait curieux de voir cet appareil provoquer deux ou trois cents résonances consécutives dans des circuits oscillants dont on diminue progressivement la longueur d'onde propre par réduction des capacités et des selfs.

REMARQUE. — A défaut d'un multivibrateur, on peut utiliser tout autre type d'oscillateur ou d'alternateur possédant des harmoniques, et se servir, notamment, des oscillateurs à lampes fonctionnant par induction et connus sous le nom d'*hétérodynes*. Le grand avantage du multivibrateur est de permettre de passer d'un seul coup de la fréquence musicale étalon de 1.000 périodes ($\lambda = 300.000$ mètres) à une fréquence de télégraphie sans fil, en faisant résonner les harmoniques élevés : le 60^e harmonique, par exemple, a une fréquence de 60.000 périodes et une longueur d'onde de 5.000 mètres. Si l'on règle ensuite le multivibrateur sur cette dernière longueur d'onde comme longueur fondamentale⁽¹⁾, et si l'on utilise le 50^e harmonique, on atteint

(1) Il est plus commode de prendre ainsi un échelon intermédiaire que d'utiliser directement des harmoniques de rangs extrêmement élevés, qui sont beaucoup trop rapprochés les uns des autres.

par un nouveau bond la longueur d'onde de 100 mètres, et l'on couvre ainsi toute l'échelle des longueurs d'onde de la T. S. F. en ne prenant que deux échelons intermédiaires. Avec des oscillateurs moins riches en harmoniques que le multivibrateur, les modes opératoires sont tout à fait semblables, mais le nombre des échelons intermédiaires est nécessairement plus considérable.

VI. Mode opératoire pour l'étalonnage d'un ondemètre. — La *fig. 3* indique le schéma de montage. Un bobinage de quelques tours de fil, intercalé entre les deux bornes B du multivibrateur,

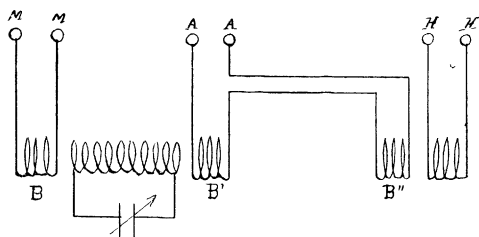


FIG. 3.

sert à exciter par induction le circuit oscillant de l'ondemètre. Ce circuit oscillant réagit aussi par induction sur une bobine analogue B', que l'on relie à un appareil *très sensible* servant à la détection des courants de haute fréquence, comme dans les réceptions ordinaires de T. S. F. On emploie pour cela un amplificateur à lampes ⁽¹⁾, pour haute fréquence, qui sert en même temps de détecteur, et avec lequel on écoute au téléphone.

Une troisième bobine auxiliaire, B'', placée comme la bobine B' dans le circuit d'entrée de l'amplificateur, sert à faire agir les ondes locales d'un oscillateur hétérodyne, pour l'observation des oscillations du circuit de l'ondemètre par une méthode de battement, comme on le fait dans la réception des ondes entretenues de la T. S. F.

L'observation des résonances se fait en écoutant avec le téléphone de sortie de l'amplificateur, et en cherchant les maxima d'intensité des sons de battements. La seule précaution à prendre, — mais elle

(1) Nous avons utilisé successivement les amplificateurs des types R (à 9 lampes), puis R₆ (à 8 lampes), que nous avons étudiés pour la radiotélégraphie militaire.

est tout à fait essentielle, — c'est d'opérer toujours avec des couplages extrêmement faibles des divers circuits les uns avec les autres, afin d'éviter leurs réactions mutuelles.

Avec ce montage, si l'on n'allume pas les lampes de l'hétérodyne, on entend, dans le téléphone récepteur, un son musical permanent, qui a la fréquence de l'émission fondamentale à 4.000 périodes (environ ut_3) du multivibrateur. La première opération à faire est alors de régler les condensateurs du multivibrateur de manière que ce son soit exactement à l'unisson avec celui du diapason étalon (ut_3) que l'on écoute directement, sans retirer les téléphones. L'oreille entend les deux sons en même temps, et, grâce à l'observation des battements, il est très aisé d'arriver à un unisson presque parfait, réalisable, par exemple, à une fraction de millième près quand il s'écoule plusieurs secondes entre les battements.

Les choses étant en cet état, si l'on fait varier la capacité ou la self de l'ondemètre, on observe toute une série de renforcements du son ut_3 , correspondant aux résonances successives de tous les harmoniques du multivibrateur avec la fréquence propre de l'ondemètre. Pour faire une graduation de demi-précision, on pourrait se contenter de l'observation de ces renforcements. Mais on risquerait ainsi de petites erreurs dues aux inégalités d'intensités que présentent les harmoniques successifs, et il convient d'opérer un peu différemment, en allumant l'hétérodyne, et en portant son attention sur les sons de battements ⁽¹⁾.

On gagne ainsi, tout d'abord, en sensibilité, ce qui permet des couplages plus faibles; et, en outre, le son constant ut_3 de la fréquence fondamentale cesse de s'imposer à l'oreille qui ne perçoit plus, pratiquement, que le son de battements entre les oscillations entretenues de l'hétérodyne, et celles que le multivibrateur crée dans le circuit oscillant. Dans le son complexe qu'elle reçoit, l'oreille isole la note de ce son de battements; et, quand l'harmonique correspondant est en résonance, tout se passe comme s'il existait seul. Aucun trouble n'est apporté par l'existence des harmoniques voisins, qui ne sont pas entendus, ou bien qui donnent une note très différente.

(1) L'emploi de l'hétérodyne est, d'autre part, indispensable, lorsque on arrive aux petites longueurs d'onde, et que l'on est forcé d'utiliser, comme on l'a vu ci-dessus, un multivibrateur de fréquence fondamentale beaucoup trop élevée pour être audible : seuls les sons de battements pourront alors être perçus.

Au moment de la résonance, la fréquence des vibrations propres de l'ondemètre est exactement un multiple entier de la fréquence fondamentale du multivibrateur, égale, elle-même, à celle du diapason. Si l'on désigne par N cette dernière fréquence (nombre de périodes par seconde), par n le rang de l'harmonique, par V la vitesse des ondes, égale à $2,999 \cdot 10^{10}$ C. G. S., la longueur d'onde λ qu'il faut inscrire sur la graduation de l'ondemètre est donnée par la formule très simple :

$$\lambda = \frac{V}{Nn}.$$

VII. Numérotage des harmoniques. Méthode des octaves. — Dans la plupart des cas, il n'y a pas à se préoccuper de ce numérotage. L'ondemètre à étalonner porte une graduation établie par construction, qui est, en général, assez bonne pour que l'on puisse prendre pour le rang n de l'harmonique le *nombre entier* le plus voisin de la fraction $\frac{V}{N\lambda_0}$, dans laquelle λ_0 est la valeur lue sur la graduation.

Si, par exemple, on observe une résonance vers la longueur d'onde 20.000 mètres, cette résonance correspond certainement à l'harmonique de rang 13, car, en pratique, l'erreur de la graduation est inférieure à $\frac{1}{13}$. Dans ce cas, du reste, le contrôle est facile. On ajoute progressivement des capacités graduées à la capacité de l'ondemètre, et l'on observe successivement, en les comptant, toutes les résonances jusqu'à la résonance sur la vibration fondamentale du multivibrateur.

Quand on arrive aux harmoniques de rangs élevés, il est commode de les repérer, d'octave en octave, par comparaison avec des harmoniques de rang connu de l'hétérodyne. Ayant établi la résonance de l'ondemètre sur un harmonique déterminé du multivibrateur, de rang n , on amène l'hétérodyne à être à l'unisson exact avec cet harmonique. On reconnaît l'unisson à ce que le son de battements devient très grave, puis disparaît pour ne plus laisser entendre que le son fondamental ut_3 du multivibrateur. Ceci fait, on supprime l'action du multivibrateur, et l'on cherche la résonance de l'ondemètre pour le premier harmonique de l'hétérodyne, qui est exactement à l'octave du fondamental. Faisant de nouveau agir le multivibrateur, on constate que l'ondemètre est juste en résonance avec un nouvel harmonique du multivibrateur, et l'on peut être

assuré que cet harmonique est à l'octave du précédent, c'est-à-dire que son rang est égal à $2n$. On passe ainsi, par exemple, de l'harmonique de rang 15 d'où l'on est parti, à l'harmonique de rang 30, puis à celui de rang 60.

On peut remarquer, enfin, que cette *méthode des octaves* est complète par elle-même et fournit aussi, directement, le rang du premier harmonique d'où l'on est parti. On a, en effet, noté deux points de l'échelle de l'ondemètre, pour lesquels il y a résonance sur les harmoniques de rangs n et $2n$. Mais, entre ces deux harmoniques, il doit y en avoir et il y en a effectivement $n - 1$ autres. Si donc nous voulons connaître le rang n , il nous suffit de compter combien il y a de résonances entre ces deux harmoniques à l'octave ; ce nombre, augmenté d'une unité, fournit le rang n que l'on cherche.

La méthode des octaves rend surtout des services pour les petites longueurs d'onde, correspondant à des harmoniques de rang très élevés du multivibrateur. Ces harmoniques sont alors si serrés que leur décompte direct serait pénible : la méthode des octaves le rend très aisé.

VIII. Résultats et conclusions. — Les opérations que nous venons de décrire comportent, toutes, une grande précision.

L'étalonnement du diapason qui accompagne le multivibrateur a été fait, une fois pour toutes, au dix-millième près, et les corrections de température sont peu importantes : la fréquence augmente d'environ un dix-millième quand la température s'abaisse de un degré. La mise à l'unisson du multivibrateur avec le diapason étalon est réalisable avec une précision du même ordre, et peut être maintenue pendant toute la durée des mesures. L'expérience a montré enfin que l'exactitude avec laquelle on observe les résonances sur les harmoniques n'est limitée que par la précision même des lectures sur la graduation de l'ondemètre, et par le jeu inévitable qu'il faut laisser dans le mouvement de l'axe de rotation des organes de réglage.

En définitive, l'étalonnement d'un ondemètre se fait ainsi en toute sécurité avec une précision d'environ *un millième*, ce qui est largement suffisant pour tous les besoins techniques de la télégraphie sans fil, et même pour l'utilisation des ondemètres étalonnés dans les mesures de précision faites en haute fréquence.

Cette méthode de mesures absolues, fondée sur l'utilisation des

harmoniques, diffère beaucoup, dans son principe même, des méthodes employées antérieurement pour la détermination des longueurs d'onde en valeurs absolues. Pour faire ressortir ce en quoi elle peut constituer un progrès, on pourrait, jusqu'à un certain point, la rapprocher de la méthode créée par M. Michelson pour la mesure du mètre en longueurs d'ondes lumineuses. Dans l'expérience d'optique, les longueurs à comparer sont dans le rapport de 1 à environ 4.600.000. Les échelons intermédiaires sont comparés par des procédés interférentiels, et la grande exactitude des résultats est due à ce que les franges se succèdent suivant une loi qui est représentée exactement par la loi de succession des *nombres entiers*.

Dans le travail actuel, ce sont deux *durées* que l'on compare : la période d'une oscillation électrique de courte longueur d'onde et la période des battements de l'horloge astronomique. Pour une longueur d'onde de 100 mètres, le rapport de ces périodes est celui de 1 à 6.000.000. Les échelons intermédiaires sont fixés par les harmoniques du multivibrateur, et l'on peut dire que la précision des résultats tient à la même cause que dans les expériences de Michelson : la loi de succession des harmoniques est, ici encore, *exactement* la loi de succession des *nombres entiers*.
