

Objekttyp: **Chapter**

Zeitschrift: **Mémoires de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles. Mathématique et physique = Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Freiburg. Mathematik und Physik**

Band (Jahr): **5 (1929-1943)**

Heft 1: **Contribution à l'étude de la circulation électrique en haute fréquence dans les circuits complexes**

PDF erstellt am: **30.06.2024**

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

### **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## CHAPITRE III

### 1. Conditions expérimentales.

Pour nos expériences, nous avons adopté le dispositif suivant, donné par la figure (6) et pour lequel la théorie générale a été appliquée et nous a conduit au développement du paragraphe du chapitre précédent.

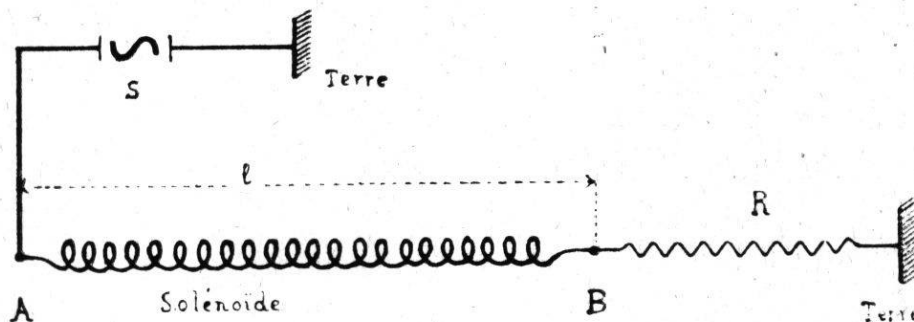


Fig. 6

Schématiquement, une source  $S$  de courant alternatif, de fréquence variable, a un de ses pôles réuni à la terre, l'autre est réuni à l'extrémité  $A$  d'un solénoïde  $AB$ , de longueur  $l$ . Le solénoïde  $AB$  figure dans le cas particulier de nos expériences le système complexe le long duquel vont se produire les ondes électriques. L'extrémité  $B$  du solénoïde est réunie à la terre par une résistance ohmique  $R$ .

Nous nous sommes préoccupés, avant tout, dans l'élaboration de ce schéma, de trouver un circuit qui se présente dans les conditions les plus favorables aux expériences et au calcul.

Il y a lieu de souligner un certain nombre de conditions qui doivent être nécessairement remplies.

a. — Pour produire des ondes électriques dans un solénoïde les auteurs préconisent différents systèmes.

- a) Excitation forcée par liaison galvanique,
- b) Excitation par induction électromagnétique,
- c) Excitation par induction électrostatique,.

Or, dans le développement de la théorie, nous avons admis les facteurs caractéristiques  $r$ ,  $x$ ,  $g$ ,  $b$ , définissant le système, comme étant des fonctions constantes le long du solénoïde, ce qui signifie, que nous avons admis un système homogène quant à la distribution des facteurs caractéristiques. Pratiquement, pour un solénoïde droit il est impossible de remplir cette condition, car si nous considérons la situation d'une spire vis-à-vis des spires voisines, nous voyons que les spires situées aux extrémités du solénoïde ne sont pas dans la même situation que par exemple les spires centrales. C'est donc dire que le caractère d'homogénéité n'existe pratiquement pas et cela d'autant moins que le solénoïde est plus court. Il est facile de concevoir un système où cette anomalie n'existerait pas ; ce serait le cas d'un solénoïde bobiné en forme de tore. Ce défaut d'homogénéité peut être facilement mis en évidence ; il se manifeste par une distribution irrégulière des nœuds et des ventres le long du système.

Concernant l'homogénéité du système, une cause de perturbation importante est celle qui s'introduit dans le cas d'excitation par induction électrostatique et surtout d'induction électromagnétique. Au solénoïde s'ajoute alors, localisé en un endroit déterminé, soit une capacité due à l'armature du condensateur du circuit d'excitation électrostatique, soit une induction-mutuelle due à la bobine d'excitation électromagnétique. Il en résulte qu'en cet endroit, les facteurs caractéristiques de l'unité d'élément du système sont différents du restant du circuit, et l'homogénéité du système est détruite.

L'excitation par induction électrostatique n'est pratiquement pas employée pour des systèmes comme les solénoïdes, à cause surtout des trop petites quantités d'énergie

utilisable. C'est le procédé qu'on utilise fréquemment dans les montages « Lecher », pour l'étude de la circulation électrique en très haute fréquence dans les systèmes composés de fils parallèles et de ponts.

Par contre, l'excitation par induction électromagnétique est très fréquemment employée pour la production d'ondes dans les solénoïdes. La méthode consiste à placer dans le voisinage du solénoïde et parallèlement à sa section, un petit bobinage faisant partie d'un circuit d'excitation à haute fréquence.

A ce système d'excitation se rattache le système Tesla, le système Oudin et les nombreux autres systèmes qui fonctionnent sur le même principe. L'excitation électromagnétique, généralement utilisée en T.S.F., a l'avantage de produire des phénomènes de grande intensité. Ainsi, le solénoïde qui sert à nos expériences, excité électromagnétiquement par une petite bobine (35 tours de fil, diamètre moyen 12,5 cm., largeur 3 cm.) placée à l'intérieur en son milieu, nous a donné dans des essais, pour la résonance demi-onde une différence de potentiel aux extrémités dépassant 65 300 volts. La lecture des tensions se faisait sur voltmètre électrostatique Abraham & Villard, placé aux extrémités du solénoïde; la fréquence était 822, dans la bobine d'excitation soumise à une tension de 20 volts, circulait un courant de 5,2 ampères. Le courant secondaire au milieu du solénoïde était de 26 milliampères.

Nous pouvons, dans les mêmes conditions d'excitation, en élevant la fréquence, produire la résonance des autres partiels, mais la distribution irrégulière des nœuds et des ventres le long du solénoïde montre avant tout comment la présence du bobinage d'excitation vient troubler l'homogénéité du système.

Ces inconvénients n'existent pas dans le cas d'excitation par liaison galvanique. Le tableau ci-après montre quelle est la distribution des ventres de courant le long du solénoïde dans les deux cas, d'excitation électromagnétique et dans le cas d'excitation par contact galvanique.

Le tableau se rapporte à des partiels de même ordre: 7 demi-ondes pour l'excitation par induction, 7 demi-ondes pour l'excitation par contact galvanique. Les phénomènes sont du même ordre d'intensité.

|   |  |
|---|--|
| <b>1<sup>er</sup> CAS</b><br><b>Excitation<br/>par induction<br/>électr.-mag-<br/>nétique</b> | <b>Position par rapport à une division en cm. des<br/>ventres de courant le long du solénoïds.</b>         |
|   | 5,2 21,4 35,4 45,9 54,5 63,3 74,4 86,8 cm.<br>distance entre les ventres<br>16,2 14 10,5 8,6 8,8 11,1 14,3 |
| <b>2<sup>me</sup> CAS</b><br><b>Excitation<br/>par liaison<br/>galvanique</b>                 | <b>Position des ventres de courant.</b>  |
|   | 8,6 22 33 43,7 54,4 65,3 77,2 90 cm.<br>distance entre les ventres<br>13,4 11 10,7 10,7 10,9 11,9 12,8     |

Il ressort clairement que dans le premier cas la distance entre les ventres de courant varie beaucoup, elle passe de 8,6 à 16,2 cm., c'est-à-dire qu'elle double à peu près de valeur; dans le second cas au contraire, les différences sont beaucoup plus petites et plus régulières; dans les deux cas la distance entre ventres successifs est plus grande aux extrémités que vers le milieu de la bobine; cela provient certainement du manque d'homogénéité dû à la situation des spires extrêmes, défaut qui existe dans les deux cas, mais qui paraît plus accentué dans le premier cas, par le fait que la présence au milieu du solénoïde de la bobine d'excitation augmente les facteurs self et capacité des spires centrales, ce qui se traduit à la résonance par un rapprochement des ventres du courant.

Ces considérations ont leur importance, puisque dans les conditions où nous nous plaçons, il y a lieu avant tout de travailler sur un circuit qui se rapproche autant que possible du circuit idéal tel que l'exige la théorie.



*b.* — Dans l'ordre des perturbations causées, il y a lieu de souligner l'influence du rayonnement et des effluves qui se produisent dans le cas où les phénomènes de résonance sont très intenses. Dans l'exemple cité plus haut, de résonance demi-onde, avec 65 300 volts aux bornes, le rayonnement électrique était à même de rendre incandescent le gaz d'une lampe au néon, tenue à la main et placée à plus de 0,50 m. de l'extrémité du solénoïde. Il se produit de nombreuses effluves qui jaillissent des extrémités de la bobine et qui ne sont pas sans troubler le phénomène. Certes, dans notre théorie générale nous avons prévu le cas en introduisant dans nos équations les facteurs  $r$  et  $g$ , contenant des éléments qui ont la nature respectivement d'une résistance ohmique et d'une conductibilité ohmique (page 23) et qui tiennent compte des pertes d'énergie par rayonnement et des effluves dues à la mauvaise isolation, mais à cause de leur caractère imprécis, il y a lieu de diminuer autant que possible l'influence de ces facteurs qui ne sont pas fondamentaux, mais qui ont plutôt le caractère de facteurs de perturbation.

Ces considérations nous ont décidé à travailler avec des tensions aussi faibles que possible pour éliminer les effluves et rendre négligeable le rayonnement, à placer le solénoïde dans des conditions géométriques bien définies et pour ne pas causer de perturbations lors des mesures, en s'approchant du système de faire ces dernières à distance à la lunette.

*c.* — Au sujet des mesures, il y a lieu de faire certaines remarques. L'introduction d'appareils de mesure dans le circuit est cause très fréquemment de modifications qui, dans le circuit, peuvent changer complètement des conditions fondamentales imposées. Ainsi, dans le cas d'un solénoïde, on sait que des solutions caractéristiques existent suivant que l'une de ses extrémités est isolée où qu'elle se trouve mise à la terre. Dans un premier cas, il se produit à cette extrémité des phénomènes de résonance de tension. Dans le second cas des phénomènes de résonance

d'intensité; or, si l'on se propose d'étudier ce genre de résonance, on est obligé de placer entre l'extrémité isolée et la terre un voltmètre, c'est-à-dire un appareil qui, de par ses conditions de fonctionnement détruit la condition fondamentale pour l'existence de la résonance de tension. On peut faire une remarque analogue dans le cas de mesure de résonance d'intensité. La condition d'existence du phénomène est que l'extrémité soit mise à la terre, or, la mesure exige l'interposition d'un ampèremètre entre la terre et cette extrémité, c'est-à-dire d'un appareil qui introduit nécessairement une résistance, donc détruit la condition fondamentale qui est ici l'absence de résistance interposée entre l'extrémité de la terre. On est dans une situation analogue lorsque en acoustique on veut étudier ce qui se passe à l'extrémité d'un tuyau ouvert en vibration on est obligé de placer un petit appareil, une petite membrane, pour mesurer les tensions, et cet appareil placé à l'extrémité du tuyau change la condition parfaite imposée et dans le cas d'un tuyau fermé la mesure reviendra à faire une petite ouverture ce qui modifie plus ou moins le phénomène en changeant aussi les conditions fondamentales imposées. Il suit de là, que, pratiquement, aucune mesure ne se fait dans les conditions d'existence idéale du phénomène, qui sont pour ainsi dire des cas limites et la mesure nous place toujours dans une situation intermédiaire plus ou moins rapprochée de l'un ou de l'autre cas limite. Pour cette raison, il convient de développer la théorie qui correspond au cas réel, c'est-à-dire le cas de l'interposition d'un conducteur  $R$  entre l'extrémité de la bobine et la terre. Et dans les conditions  $R = 0$  et  $R = \infty$ , nos équations donnent l'état électrique des deux cas limites extrêmes. Nous avons admis dans le cas de nos mesures que le conducteur interposé était de la nature d'une résistance ohmique, mais nous aurions très bien pu d'une façon plus générale introduire pour ce conducteur des grandeurs: résistance ohmique, self-induction, et capacité, en donnant à  $R$  les composantes d'une impédance. Par exemple des

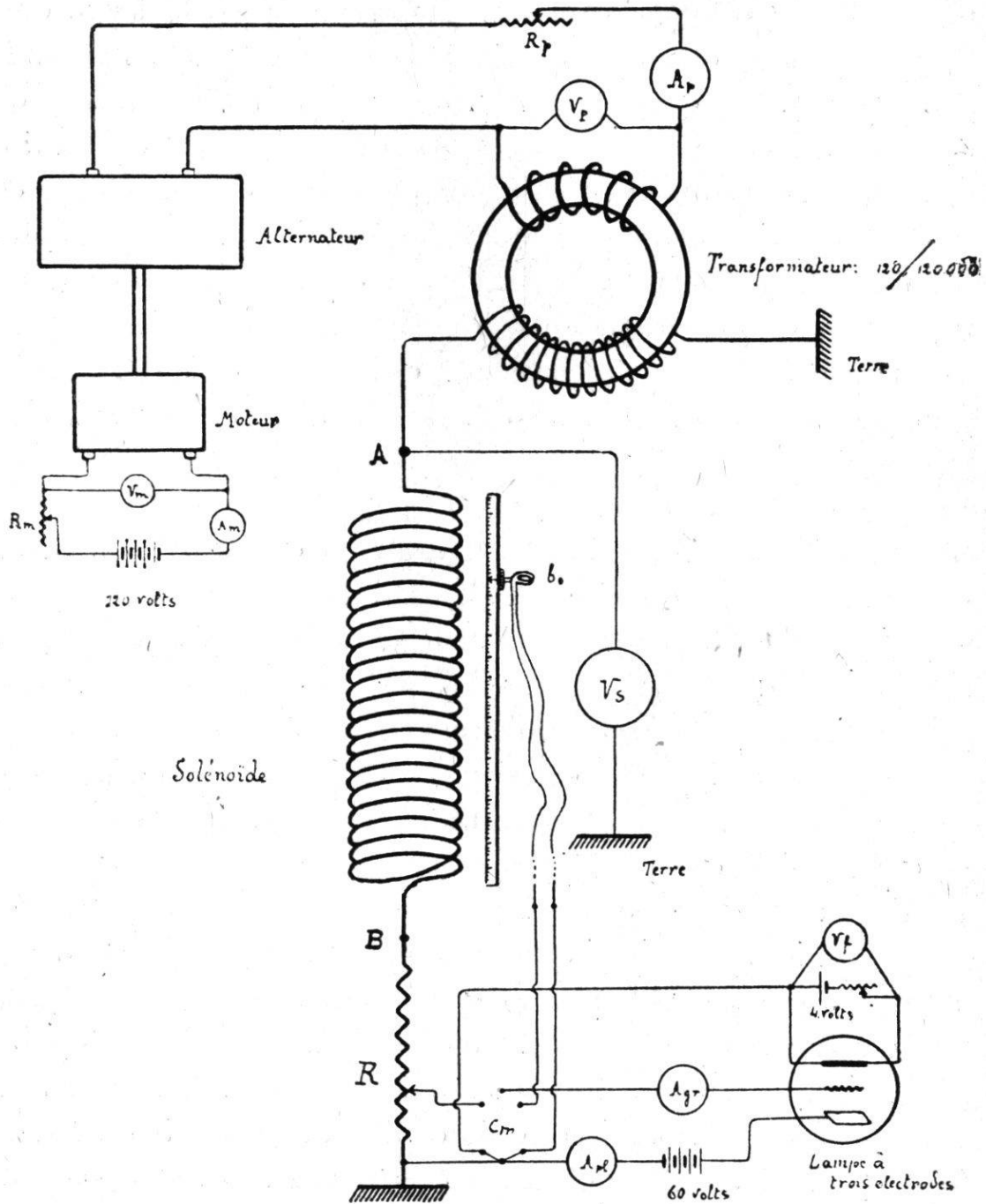
mesures de tensions à l'extrémité à l'aide d'un voltmètre électrostatique interposé entre l'extrémité et la terre correspondrait au cas où  $R$  a la nature d'une capacité. Dans la pratique, pour que les mesures soient intéressantes, on cherche à s'écarter le moins possible de l'un ou de l'autre cas limite. Comme d'une part les mesures de résonance de tension à l'aide d'un voltmètre nous éloigne beaucoup plus du cas limite résonance d'intensité, nous avons déjà un argument en faveur de cette dernière mesure; d'autre part les considérations précédentes qui nous ont déterminé, pour sauver l'homogénéité du système à utiliser l'excitation par contact galvanique, nous imposait déjà des mesures de résonance d'intensité.

Ainsi, notre circuit correspond en quelque sorte à un circuit simple formé d'une self-induction et d'une capacité en série, circuit aux bornes duquel une tension constante serait appliquée et pour lequel on étudierait sur un ampèremètre le phénomène de résonance d'intensité.

Pour une tension constante, l'intensité du courant à la résonance va en diminuant avec les partiels croissants ce qui signifie qu'il faut pour une série de mesures fixer la tension appliquée suivant la sensibilité de l'appareil de mesure. Nous avons pu réduire cette tension jusqu'à 500 volts, et c'est cette valeur que nous avons gardée pour toute la série des mesures. Comme la source  $S$  n'est pas à même de fournir directement une tension élevée, nous avons interposé entre  $S$  et le circuit d'utilisation un transformateur qui soit à même de nous donner la tension constante exigée.



**Schéma complet du circuit d'expériences :**



**2. Dispositif expérimental.**

La source  $S$  est un alternateur à fer tournant denté<sup>1</sup> entraîné par un moteur à courant continu dont on peut faire varier la vitesse de rotation entre des limites qui sont pratiquement de 120 à 3000 tours à la minute. Le nombre

<sup>1</sup> Charles-Eugène GUYE, *L'Eclairage électrique*, t. IX, p. 157. 1896.

des dents étant de 200, la fréquence du courant produit s'étendra de 400 à 10 000. Cet alternateur construit par la Compagnie de l'Industrie électrique à Genève, comprend comme partie fixe un noyau cylindrique dans lequel le bobinage excitateur crée un champ parallèle à l'axe de la machine. Ce noyau se prolonge par un cylindre denté, de plus grand diamètre dans lequel les lignes de force magnétique s'épanouissent, suivant ainsi le chemin de réluctance minimum qui est créé par le fer tournant. Un conducteur isolé passe d'une encoche à l'autre en fermant dans une boucle simple les 400 dents du cylindre qui forment l'induit fixe de la machine.

Le fer tournant est une cloche dont la paroi intérieure, cylindrique, est entaillée de 200 dents; successivement elle ferme le circuit magnétique sur une encoche puis sur la dent voisine. La tension aux bornes est de 200 volts et l'intensité maximum 8 ampères.

La haute fréquence du courant ne permet pas de vérifier à l'oscillographe si la courbe de tension est sinusoïdale. Des essais ont été faits par la méthode de résonance de Pupin pour déceler les harmoniques éventuelles.

Ils ont permis de constater que l'amplitude des 11 premiers harmoniques est négligeable pour une excitation poussée jusqu'à 0,6 amp., valeur maximum que nous n'avons jamais dépassée.

Le nombre des tours de l'alternateur qui fixe la fréquence est déterminé à l'aide d'un compteur de mesures « Hasler » préalablement étalonné.

Le solénoïde qui figure dans notre cas, le système complexe le long duquel il y a propagation des ondes, est le secondaire d'une bobine de Ruhmkorff, construite par Klingelfuss, à Bâle. Cette bobine, à cause de caractéristiques spéciales et particulièrement de l'enroulement des spires, convient parfaitement pour la production à relativement basses fréquences, d'ondes électriques stationnaires. Cette

même bobine a déjà été utilisée et décrite par M. Grandy<sup>1</sup>.

Devant supporter de hautes tensions, elle a été construite de telle façon que pour éviter le voisinage trop rapproché des segments conducteurs soumis à des différences de potentiel élevées, l'enroulement des spires au lieu d'être comme dans des bobines ordinaires, est faite par tranches. La fig (8) donne en coupe une section à travers quatre couches de spires successives. Sur l'isolation inférieure (a), l'enroulement partant de l'extérieur se dirige en spirale vers l'intérieur en restant dans le plan de la section, une seconde isolation (b) recouvre cette première couche. L'enroulement de la deuxième couche se fait alors de l'intérieur vers l'extérieur, mais différemment, en ce sens qu'on a régulièrement réparti les isolations, c'est-à-dire de façon que les spires extérieures des couches 1 et 2 qui se trouvent être soumises à des différences de potentiel plus élevées que les spires intérieures se trouvent aussi séparées par une isolation plus grande.



Fig. 8.

L'isolation *f* sépare la couche 2 de la couche 3 et, l'enroulement de la couche 3 est identique à l'enroulement de la couche 1. Toute la bobine est faite ainsi d'une juxtaposition de couches de spires. Elle a été divisée en deux parties, ceci pour permettre l'interposition d'un milliampermètre en un point de symétrie de la bobine et aussi pour permettre de placer un skléromètre pour les mesures en radiothérapie, usage pour lequel la bobine a été construite. Cette coupure crée une petite anomalie et trouble quelque peu l'homogénéité de l'ensemble, cependant, la

<sup>1</sup> M. GRANDY, *Untersuchungen über Eigenfrequenzen und verteilte Kapazität einer viellagigen Drahtspule*. Thèse, Fribourg — 1926.

distribution régulière des partiels le long de la bobine nous indique que la perturbation causée par la coupure est négligeable.

Les autres constantes de la bobine sont les suivantes :

Résistance de la bobine :

|  |               |
|--|---------------|
| Première moitié . . . . .                  | 20 940 ohms   |
| Deuxième moitié . . . . .                  | 19 100 ohms   |
| Self-induction (50 périodes) . . . . .     | 575 henrys    |
| Nombre de tours . . . . .                  | 92 000        |
| Longueur du fil . . . . .                  | 72 500 mètres |
| Longueur de la bobine avec son isolation . | 118 cm.       |
| Longueur de la bobine sans son isolation . | 98 cm.        |
| Épaisseur du fil . . . . .                 | 0,2 mm.       |
| Diamètre intérieur de la bobine . . . . .  | 14 cm.        |
| Diamètre extérieur de la bobine . . . . .  | 34 cm.        |

L'enroulement proprement dit, long de 98 cm. est noyé dans une isolation de cire ; l'ensemble forme un cylindre de 118 cm. de longueur.

Les données techniques sont celles du constructeur, les données électriques ont été contrôlées au laboratoire.

Le transformateur élévateur de tension est un transformateur Siemens & Halske, à circuit magnétique fermé. Ses caractéristiques sont :

Rapport de transformation (50 périodes)...  $120/120\ 000$

La faible tension, 500 volts, exigée au secondaire du transformateur est fournie par un courant primaire très petit. Il en résulte que la déformation de l'onde de tension causée par l'hystérésis dans les tôles du transformateur, est dans ces conditions négligeable.

Les mesures d'intensité sont faites à l'aide d'un détecteur à lampe triode. Nous avons essayé successivement pour les mesures de courant un galvanomètre Duddell, un détecteur à galène, mais aucun de ces appareils ne nous a donné satisfaction, soit que leur sensibilité ne soit pas suffisante, soit surtout que leur réglage trop délicat et leur instabilité trop grande ne donne aucune régularité dans la mesure. Le détecteur à lampe a de nombreux avantages.

Il peut être réglé dans des conditions parfaitement déterminées de chauffage, de tension, ce qui permet de l'utiliser toujours dans un même état de fonctionnement.

Il est en outre de grande sensibilité. Pour nos mesures, nous avons utilisé le schéma de la Fig. (9). L'appareil de lecture est un micro-ampèremètre  $A_g$  placé sur le circuit de grille.

On utilise pour la détection la courbure de la caractéristique du courant de grille au voisinage du potentiel 0 de la grille.

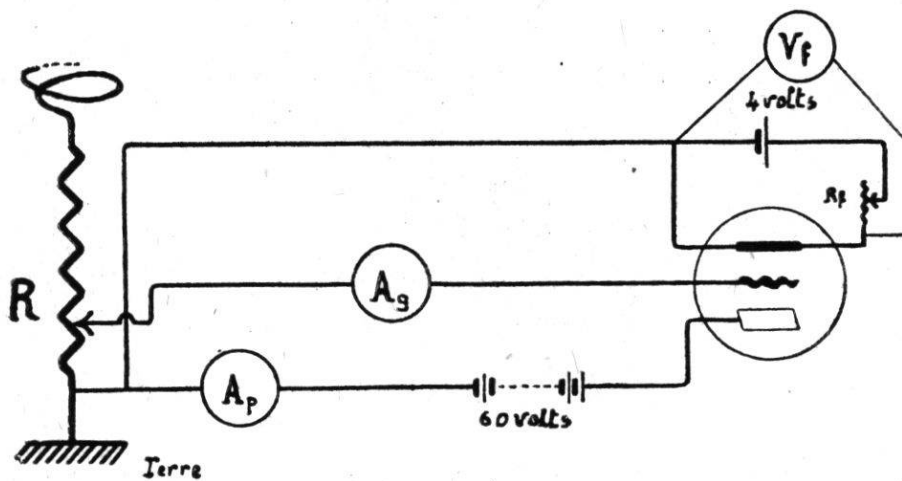


Fig. 9.

Pour un potentiel de grille variant de 0 à 0,9 volts, le courant de grille varie de 0 à  $12 \cdot 10^{-6}$  ampères, le long d'une caractéristique de grille rigoureusement parabolique. On voit qu'il est aisé d'étalonner un tel appareil de mesure. Un autre avantage de ce système de mesures est que, placé comme l'indique le schéma, on peut changer sa sensibilité en variant  $r$ ; comme la résistance  $R$  est fixe, que le détecteur représente sur  $r$  une dérivation de résistance très grande, les constantes du circuit ne changent pratiquement pas.

Un commutateur  $C_m$  (fig. 7 page 50) permet la connexion du circuit de la petite bobine  $b_0$  avec le circuit du détecteur. La petite bobine  $b_0$  (quelques spires de fil) est mobile le long du solénoïde (à l'intérieur ou à l'extérieur suivant le cas) et sert à déterminer à la résonance les ventres de courant, ce qui fixe l'ordre des partiels. Le com-



mutateur a été placé pour éviter l'installation inutile de deux détecteurs de mesures. Pratiquement, les mesures sont faites de la façon suivante: le détecteur est connecté sur  $r$  ( $r$  étant réglé pour le maximum de sensibilité fixé par l'échelle de  $Ag$ ) lorsque par accroissement de la fréquence un maximum de courant dans le microampèremètre  $Ag$  est atteint, ce qui signifie qu'un régime de résonance a lieu dans le solénoïde, on maintient le régime à cette fréquence de résonance et, connectant le circuit du détecteur sur  $b_0$ , on étudie, en déplaçant  $b_0$ , la distribution des partiels.

La tension constante appliquée, 500 volts, est réglée à l'aide d'un voltmètre électrostatique multicellulaire de Lord Kelvin. Ce voltmètre est placé entre l'extrémité  $A$  de la bobine et la terre.

On peut discuter sur les perturbations apportées aux oscillations de la bobine du fait de la présence du transformateur et du voltmètre de mesure dans le circuit du solénoïde. Il n'y a en réalité pas lieu d'envisager de perturbations de par le fait que nous sommes ramenés aux mêmes conditions de mesure lorsque en courant alternatif à basse fréquence on étudie les phénomènes de résonance d'un système formé d'une capacité en série avec une self-induction. C'est au fond un phénomène de résonance localisée qu'on étudie, lequel phénomène dépend uniquement des éléments d'un segment du circuit et des conditions électriques imposées à cet élément et est indépendant du régime et du reste du circuit.

Des essais d'interruption du circuit du voltmètre électrostatique une fois la résonance atteinte, ont d'ailleurs montré que sa présence ne modifiait en rien le régime électrique.