

Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 3 (1921)

Artikel: Contribution à l'étude de l'étincelle oscillante
Autor: Moroski, Witold
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-741052>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 12.01.2026

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

Contribution à l'étude de l'étincelle oscillante

PAR

WITOLD MOROŃSKI

(Avec 5 fig.).

INTRODUCTION.

L'étude de l'étincelle oscillante a été orientée dans une nouvelle voie par Wien¹. Ce savant s'occupe en premier lieu des condensateurs et a perfectionné un type dont le diélectrique est un gaz sous pression. Ces condensateurs, que j'appellerai dorénavant condensateurs Wien, sont exempts des pertes qui se produisent dans les bouteilles de Leyde et ne donnent pas d'effluves jusque sous une tension d'environ 40 000 volts. Il a utilisé ces condensateurs pour l'étude des décréments et a constaté que pour des électrodes de grand diamètre (22 cm) en forme de calotte, le décrement diminue avec l'augmentation de la longueur d'étincelle, au début rapidement, puis lentement, et de façon continue sans présenter de minimum jusqu'à 140 000 volts, qui est la plus haute tension qu'il ait utilisée. Ces condensateurs sont donc exempts des pertes usuelles. En utilisant le même circuit, d'abord avec étincelle, puis sans étincelle (comme circuit excité par choc), Wien a déterminé exactement soit le décrement du circuit soit celui de l'étincelle.

Plus récemment, Meissner² a donné des indications très pré-

¹ M. WIEN. *Annalen der Physik*, 29, p. 679 (1909).

² A. MEISSNER. *Jahrbuch d. drahtlosen Telegraphie*, 3, p. 57 (1910).

cises pour la construction d'une self. Il a constaté qu'on obtient le maximum de self avec le minimum de fil (par conséquent une petite résistance ohmique) si le rapport entre la hauteur de l'enroulement et le diamètre $\left(\frac{h}{D}\right)$ est d'environ 0,4 ¹.

On peut, par conséquent, établir des circuits dans lesquels la dissipation de l'énergie n'est due qu'à l'étincelle et au rayonnement, ce qui permet d'étudier plus facilement les propriétés de l'étincelle.

D'autre part, en étudiant l'effet d'un couplage serré, Wien² a découvert une propriété spéciale de l'étincelle.

En variant le couplage entre deux circuits dont le circuit excitateur comprend une étincelle avec grand décrement, il trouve un couplage pour lequel les deux oscillations du circuit accouplé se réduisent à une seule, qui est l'oscillation propre de ce circuit. En même temps, l'énergie dans ce circuit atteint un maximum. On admet que la valeur élevée du décrement du circuit primaire et la réaction secondaire produisent des battements qui, pour la valeur optimum du couplage, s'éteignent dans le primaire après un demi-battement, transmettant ainsi toute l'énergie au circuit secondaire qui subit une « excitation par choc ». Les photographies obtenues par Rau³ au moyen du miroir rotatif vérifient cette théorie. Wien a montré que des étincelles courtes (jusqu'à 5 mm) sont capables de produire ces battements, c'est-à-dire comme on le dit, « de s'éteindre par elles-mêmes », avec des étincelles plus longues, il faut introduire dans le circuit une grande résistance, afin d'augmenter l'amortissement. Celui-ci ferait perdre au circuit sa conductibilité après le premier demi-battement et permettrait à l'espace explosif de se désioniser. Par conséquent, tout moyen de désionisation semble augmenter l'éteignement. Un des meilleurs procédés pour obtenir des étincelles éteintes est l'emploi du tube de Wien (Löschröhre) : c'est un tube de Geissler intercalé dans le circuit et qui permet d'obtenir un rendement de 80-86 % en énergie transmise dans le secondaire.

¹ En faisant varier ce rapport, Meissner obtient avec un fil de 6 mètres des coefficients de self-induction compris entre 10000 et 50000 cm.

² M. WIEN. *Annalen der Physik*, 25, p. 7, 625 (1908).

³ RAU. *Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie*, 4, p. 52, (1910).

Il est impossible d'énumérer ici les très nombreux dispositifs qui ont été imaginés dans le même but ; signalons cependant comme caractéristique d'un groupe des procédés, celui de Kaltenbach¹, qui produit un bon étouffement par la formation d'étincelles partielles dues à l'ionisation de la distance explosive par la flamme d'un bec Bunsen, qui élève en même temps la température des électrodes.

La méthode qui s'impose pour l'étude complète des phénomènes de l'étincelle et de ses propriétés dynamiques, est celle de la courbe caractéristique dont la théorie générale a été donnée par Simon². Cette étude pourra être d'autant plus fructueuse, qu'on peut actuellement délimiter le rôle de l'étincelle par l'élimination des autres pertes du circuit.

Je présenterai dans ce travail les résultats d'une étude de la caractéristique (statique)

$$J_{\text{eff}} = f(v_{\text{eff}})$$

d'un circuit à étincelle dans des conditions bien définies.

J'étudierai en même temps si le changement de longueur d'onde avec la longueur d'étincelle observé principalement avec des étincelles étouffées et avec l'arc Poulsen se produit aussi pour des étincelles non étouffées, c'est-à-dire si ce changement est une propriété inhérente de l'étincelle.

CHAPITRE I.

HISTORIQUE. — MÉTHODES DE MESURE.

Les travaux sur l'étincelle oscillante jusqu'à l'année 1908 sont suffisamment développés dans la monographie de Jollos³ pour me dispenser d'en reproduire ici l'exposé. Néanmoins, il est nécessaire de mentionner les principales méthodes employées dans cette étude.

La mesure classique de mesure est due à Bjerknæs⁴. On ins-

¹ KALTENBACH. *Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie*, 7, p. 157 (1913).

² H.-TH. SIMON. *Physikalische Zeitschrift*, 6, p. 297 (1905).

³ JOLLOS. *Jahrb. d. drahtlosen Telegraphie*, 1, p. 227 (1908).

⁴ BJERKNÆS. *Annalen der Physik*, 55, p. 121 (1895).

talle à une certaine distance du circuit excitateur, dont on veut connaître le décréement, un second circuit dit résonateur, formé uniquement d'un condensateur réglable, d'une selfinduction et d'un instrument indicateur. Si le couplage est suffisamment lâche, le circuit secondaire est en général le siège de deux oscillations: l'une dite oscillation forcée, qui a la longueur d'onde et le décréement du circuit excitateur; l'autre, l'oscillation libre dont la longueur d'onde est égale à la longueur d'onde propre du circuit secondaire. Si les périodes propres des deux circuits sont égales on a dans le circuit résonateur une seule oscillation, qui est la superposition de l'oscillation libre et de l'oscillation forcée; les deux circuits sont alors en résonance. En faisant varier la capacité du condensateur dans le voisinage de la valeur qui correspond à la résonance et en portant les indications de l'instrument mesurant l'effet électrique en fonction de la capacité, on obtient une courbe qui présente un maximum et est symétrique par rapport à l'ordonnée de ce maximum. Cette courbe nous permet de déterminer la somme ($\delta_1 + \delta_2$) des décréements des deux circuits. En intercalant une résistance ohmique dans le circuit secondaire, des mesures du même genre permettent de déterminer δ_1 et δ_2 séparément.

Les nombreuses observations fondées sur cette méthode présentent des divergences avec la théorie. On constate que la somme des décréements calculée n'est pas constante. Elle est d'autant plus faible que le point de la « courbe de résonance » qui sert à sa détermination est plus éloigné du point maximum. On attribue ce fait à l'irrégularité des décharges et à ce que les conditions de la théorie ne sont pas toutes remplies. En premier lieu, l'amplitude ne décroît pas conformément aux hypothèses. Les oscillogrammes semblent en effet prouver une décroissance plutôt linéaire qu'exponentielle.

Le travail de Mackù¹ s'occupe de cette déformation de la courbe de résonance. Cet auteur fait une hypothèse qui paraît assez plausible, lorsqu'on se rapporte à ce que l'on sait sur les étincelles dites « étouffées »; les oscillations « s'arrachent » à un moment donné avant que l'énergie qu'elles possèdent soit tom-

¹ MACKÙ. *Annalen d. Physik*, 34, p. 941 (1911).

bée à zéro. Partant de cette supposition, il fait l'intégration des équations qu'il obtient et trouve deux résultats particuliers : 1° La somme des décréments diminue continuellement à partir du sommet de la courbe de résonance. 2° La somme des décréments décroît à partir du sommet et présente un minimum au milieu de la branche de la courbe. Dans ces deux cas, le décrétement trouvé par l'emploi des hypothèses de Bjerkness est plus grand que le décrétement réel ; il peut lui être égal dans le cas du minimum (milieu de la branche).

Mackù fait encore une seconde supposition et développe les calculs pour le cas où le décrétement du secondaire est égal au décrétement primaire $\delta_1 = \delta_2$ (ordinairement, on tâche, au contraire, de rendre δ_2 relativement petit par rapport à δ_1) et l'on trouve une courbe de résonance qui ne présente aucune déformation, pourvu que l'étouffement ne se produise qu'à partir du moment où l'amplitude du potentiel n'est plus que 7 % de sa valeur primitive. Mackù vérifie sa théorie par des expériences et les trouve en parfait accord.

Remarquons cependant que Mackù suppose une décroissance exponentielle des amplitudes et un décrétement constant. Or, mon exposé¹ tend à établir que la décroissance est linéaire et de plus que le décrétement ne reste pas constant (Heydweiller). De plus, dans le cas où les décrétements sont égaux et les deux circuits légèrement désaccordés, on sait, d'après la théorie de Bjerkness, que l'amplitude de la vibration qui se produit dans le résonateur varie périodiquement en décroissant selon une loi exponentielle et que l'allure de ces oscillations est analogue à celle des battements acoustiques². Le bon résultat des expériences de Mackù pourrait donc provenir de ce qu'il se trouvait dans ces conditions. Mentionnons encore que la courbe de résonance dans le circuit excité par choc n'est pas déformée. Dans ce cas, il s'agit aussi de battements.

¹ Voir plus loin, p. 63.

² C. TISSOT. *Les oscillations électriques*, p. 382, Paris (1910).

CIRCUIT A DEUX ÉTINCELLES.

Simons¹ introduisait dans le circuit une seconde étincelle aux bornes de laquelle il mettait une résistance électrolytique. La première étincelle étant maintenue constante, il variait la longueur de la seconde et par l'observation d'un ampèremètre thermique, mesurait la résistance non inductive qu'il devait ensuite intercaler à la place de la seconde étincelle pour avoir le même courant.

Cette méthode semblait avoir quelque avantage en ce qu'elle permettait, tout en maintenant constant le voltage de l'étincelle de décharge, de varier la longueur de la seconde étincelle. On croyait ainsi pouvoir étudier l'influence de la longueur de l'étincelle. Les résultats sont inconciliables avec ceux de la méthode Bjerkness. Tandis que, d'après cette dernière, la résistance de l'étincelle diminue avec la longueur, elle augmente d'après les recherches de Simons.

La théorie des étincelles dites « étouffées » nous permet de nous rendre compte de ce qui se produit. La seconde étincelle représente une perte d'énergie et peut donc être envisagée tout simplement comme un des moyens propres à produire l'étouffement. Si on fait des observations avec différentes longueurs de la seconde étincelle, on se trouve dans différents stades plus ou moins rapprochés de celui des étincelles étouffées et par conséquent dans des conditions mal définies.

MÉTHODE CALORIMÉTRIQUE.

Par la mesure de l'énergie calorifique de l'étincelle et du circuit oscillant, on a cherché à déterminer la résistance de l'étincelle. En admettant que les décharges soient régulières, il semblait possible de déterminer avec une certaine exactitude l'énergie dissipée par l'étincelle elle-même. Mais en réalité, il est excessivement difficile de tenir compte de toutes les pertes qui se produisent dans le circuit, notamment dans la self et les

¹ K. SIMONS. *Annalen der Physik*, 13, p. 1044 (1904).

condensateurs¹. De plus, cette méthode ne nous rend pas compte des propriétés dynamiques de l'étincelle.

MÉTHODE DE LA COURBE CARACTÉRISTIQUE.

La méthode de la courbe caractéristique, qui a rendu de grands services en électrotechnique et dans l'étude des phénomènes de l'arc par Simon², a été rarement employée pour l'étude de l'étincelle.

La caractéristique statique n'a pas encore été tracée : les ampèremètres à haute fréquence, qui permettent de lire le courant efficace, sont encore trop récents et la mesure du voltage efficace de l'étincelle présente de sérieuses difficultés (méthode du tube de Braun). Obtenir la valeur du voltage efficace par le calcul ne peut pas être considéré comme un procédé sûr, car le décrement et la forme de la décroissance des amplitudes, qui entrent dans la formule, ne sont pas encore déterminés avec rigueur.

L'étude de la caractéristique dynamique à l'aide du tube de Braun a été faite, en premier lieu, par Richarz et Ziegler³, Zenneck⁴, Barkhausen⁵. Ils trouvent que la chute d'amplitudes est linéaire et tend à devenir exponentielle, dès qu'on met une certaine résistance ohmique dans le circuit.

Une étude très détaillée, mais malheureusement d'un cas trop spécial, a été faite par Roschansky⁶. Son étude se rapporte à un circuit à deux étincelles⁷. Roschansky a adopté un dispositif spécial pour les oscillogrammes. Son circuit est composé d'une capacité (bouteille de Leyde), d'une self et des deux étincelles. La seconde étincelle sert à déterminer séparément, comme il le dit, l'influence de l'étincelle sur le décrement (celui-ci

¹ Voir J. J. STÖCKLY. *Schweiz. Elektr. Zeitsch.*, 6, p. 309 (1909).

² H.-TH. SIMON. *Physik. Zeitschrift*, 6, p. 297 (1905).

³ F. RICHARZ et ZIEGLER. *Annalen der Physik*, 1, p. 468 (1900).

⁴ ZENNECK. *Annalen der Physik*, 13, p. 822 (1904).

⁵ BARKHAUSEN. *Physik. Zeitschrift*, 8, p. 624 (1907).

⁶ ROSCHANSKY. *Annalen der Physik*, 36, p. 281 (1911).

⁷ Voir ce travail p. 60.

dépendant aussi des autres données du circuit). En général, pour obtenir la courbe des oscillations en fonction du temps, on observe le tube Braun au moyen d'un miroir rotatif. Roschansky se sert d'un nouveau procédé¹. En parallèle avec l'étincelle se trouve un second circuit composé d'un condensateur, d'une self et d'une grande résistance, de sorte que l'oscillation y est apériodique. Il relie deux points de la résistance de ce circuit à deux plaques formant condensateur à l'extérieur du tube Braun. Ce condensateur est perpendiculaire à celui qui donne l'oscillogramme du potentiel et produit un déplacement latéral du point cathodique selon l'axe des temps. Le rayon cathodique se trouve donc soumis à l'action de deux champs, et la courbe tracée est la résultante de leurs actions. Mais un second point me paraît présenter un plus grand inconvénient. On pourrait admettre que le développement de l'oscillogramme selon l'axe des temps soit produit par un circuit complètement indépendant, mais on ne peut sans changer les conditions du circuit de décharge, admettre le couplage galvanique que Roschansky a employé : dans son cas, l'étincelle sert à décharger deux circuits oscillatoires dont l'un comprend une grande résistance. De plus, la présence d'une seconde étincelle dans le circuit doit compliquer les phénomènes. On peut donc comprendre pourquoi Roschansky croit avoir constaté une chute d'amplitude exponentielle pour des ondes comprises entre 100 et 150 m (électrode Mg.), résultat qu'il ne maintient pas d'ailleurs dans la suite².

Roschansky croit pouvoir conclure³ que l'étincelle joue le rôle d'une force électromotrice dont l'amplitude ne change pas beaucoup pendant les oscillations. La force de la courbe el. motrice dépend du métal et est caractérisée par une asymétrie et un maximum en forme de crochet (Zacken) que Roschansky explique par l'existence dans le train d'ondes d'un stade d'effluves (Glimmstromphase) et par la variation d'amplitudes des oscillations. Il conclut de la petite valeur de la force el. motrice que la forme prédominante de la décharge est analogue à celle de

¹ ROSCHANSKY. *Physikalische Zeitschrift*, 9, p. 62 (1908).

² ROSCHANSKY. *Physik. Zeitsch.*, 9, p. 634 (1908).

³ ROSCHANSKY. *Annalen der Physik*, 36, p. 306 (1911).

l'arc¹ et qu'un stade d'effluves (Glimmstromphase) prend naissance au moment où l'arc s'éteint. En même temps, la forme de la courbe fait constater l'existence d'harmoniques supérieures et l'éteinte des oscillations après un certain nombre de vibrations. Il semble dire, sans cependant l'affirmer expressément, que la chute des amplitudes est linéaire, tandis que dans son travail antérieur (même dispositif), il prétend qu'elle est exponentielle, et que l'amortissement dû à l'étincelle, à une fréquence assez élevée, peut être assimilé à celui que produit une résistance constante.

Je crois que la constance du décrement observée par Roschansky est due à l'influence du circuit apériodique dont la grande résistance sert à développer l'oscillogramme selon l'axe du temps et à l'action de la seconde étincelle. A part cela, l'oscillogramme de Roschansky montre bien un éteinte des oscillations, mais il ne permet pas de conclure à un éteinte complet.

La meilleure preuve que la chute d'amplitude est linéaire dans les circuits à étincelle a été fournie par L. Chaffee². Il a fait l'oscillogramme d'une étincelle introduite dans le circuit excité par choc. Les oscillations qui se produisent dans un pareil circuit sans étincelle ont la forme sinusoïde dont l'amortissement est exponentiel. (La régularité de la courbe de résonance en est une preuve.) Chaffee prouve par des oscillogrammes que la décroissance est encore exponentielle lorsqu'on intercale une petite résistance dans le circuit. (La formule qui donne l'augmentation du décrement $\eta = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}$ calculée pour des oscillations exponentielles, s'applique très bien à ce circuit)³. Or, en remplaçant cette résistance par une étincelle très courte, la

¹ Remarquons que la mesure du potentiel est effectuée sur la courbe au point correspondant à ce commencement du régime de l'arc; ainsi s'expliquent les petites valeurs du potentiel; il dit d'ailleurs: « In dem Moment, wo die Stromstärke im Funken durch den Nullwert geht, wächst die Funkenspannung fast momentan bis auf etwa 400 Volt um dann schnell auf einige zehner Volt zurückfallen. » *Physikalische Zeitschrift*, 13, p. 931 (1912).

² L. CHAFFEE. *Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie*, 7. p. 477 (1913).

³ M. WIEN. *Annalen der Physik*, 25, p. 654 (1908).

chute des amplitudes devient linéaire. L'étincelle n'équivaut donc pas à une résistance purement ohmique.

En même temps, Chaffee a observé que les oscillogrammes peuvent présenter deux formes différentes qui correspondent l'une à l'étincelle et l'autre à l'arc. Dans les deux cas, la chute d'amplitude est linéaire. Les oscillations sont encore sinusoïdales pour l'arc, mais pour l'étincelle, elles sont déformées et confuses (verzerrt). L'arc se produit entre des électrodes de charbon, Mg et Al, tandis que l'étincelle s'obtient par un refroidissement des électrodes. (C'est un fait connu que le refroidissement rend les étincelles actives, c'est-à-dire propres à produire des oscillations). Chaffee explique pourquoi les images sont déformées et confuses dans les cas de l'étincelle : Si la température des électrodes est basse, la conductibilité de la distance explosive disparaît, lorsque la courbe du courant passe par zéro, c'est-à-dire qu'à ce moment la résistance de la distance explosive redevient grande. Il faut donc une ionisation nouvelle chaque fois que le courant part de zéro, c'est-à-dire chaque fois que la courbe s'éloigne de l'axe : de là sa déformation.

Malheureusement, l'étude du circuit par le tube de Braun n'a pu être entreprise dans mon travail, mais je me permettrai quand même de signaler ici plusieurs aperçus que j'ai projetés. En premier lieu, pour avoir des oscillogrammes plus distincts, il faudrait pouvoir augmenter l'intensité lumineuse du rayon cathodique, tout en laissant sa projection ponctuelle ; il suffirait de donner à l'électrode une forme appropriée. Or, cette condition me semble parfaitement réalisable par l'application au tube Braun du dispositif à émission d'électrons, qui a été employé pour les tubes Röntgen par Coolidge et Lilienfeld¹. Vu l'importance que présente une étude de la force el. motrice dans le cas des étincelles plus longues, il me semble bon d'employer pour le condensateur du tube des plaques plus épaisses avec des bords recourbés. On pourrait aussi, au besoin, diminuer la tension appliquée au condensateur du tube Braun en le mettant en série avec d'autres condensateurs.

¹ Un tube Braun basé sur ce principe est actuellement réalisé par Samson *Annalen der Physik*, 55, p. 608 (1918). Je me permettrai, à ce propos de remarquer que ma thèse fut présentée le 20. 5. 1918.

THÉORIE.

Bien qu'il me semble nécessaire, pour donner une théorie complète de l'étincelle oscillante, de connaître les propriétés statiques et dynamiques qu'on peut déduire de la courbe caractéristique, j'exposerai quelques éléments de la théorie de Heydweiller¹, qui rend compte d'une façon générale des phénomènes observés².

En se fondant³ sur les observations de Koch. Heydweiller trouve que la décharge oscillante de l'étincelle peut très bien être représentée par la courbe caractéristique des effluves.

$$(1) \quad a = v + \frac{b}{i}$$

a, b , constantes dépendant de l'étincelle.
 v , chute de tension entre les électrodes.
 i , courant dans le circuit.

Cette équation nous permet de représenter l'énergie de l'étincelle par

$$(2) \quad f = \int_0^{t_1} v i dt = a q_1 + b t_1$$

q_1 quantité d'électricité qui traverse le circuit.
 t_1 durée de la décharge.

L'équation de Kirchhoff-Thomson,

$$(3) \quad p \frac{dq}{dt} \frac{d^2q}{dt^2} + r \left(\frac{dq}{dt} \right)^2 + \frac{q}{c} \frac{dq}{dt} = 0$$

où

$$\begin{aligned}
 p &= \text{self} \\
 r &= \text{résistance} \\
 c &= \text{capacité} \\
 q &= \text{la charge au moment } t
 \end{aligned}$$

prend alors la forme

$$(4) \quad p \frac{dq}{dt} \frac{d^2q}{dt^2} + r \left(\frac{dq}{dt} \right)^2 + \left(\frac{q}{c} - a \right) \frac{dq}{dt} + b = 0.$$

¹ HEYDWEILLER. *Annalen der Physik*, 19, p. 649 (1906).

² Barkhausen obtient dans sa théorie à peu près les mêmes résultats. *Physik Zeitsch.*, 8. p. 624 (1907).

³ D'après l'exposé de Kamerase, Inaugural Dissertation. Rostock, 1915.

L'intégration générale de cette équation n'est pas résolue à l'heure actuelle; mais on peut, dans quelques cas spéciaux, trouver les rapports des constantes a et b caractéristiques de l'étincelle.

Admettons que la self et la résistance sont de valeurs moyennes, que

$$\frac{4p}{r^2c} > 1$$

c'est-à-dire que la décharge est oscillatoire et posons d'abord

$$b = 0.$$

L'équation (4) prend alors la forme

$$(5) \quad p \frac{dq}{dt} \frac{d^2q}{dt^2} + r \left(\frac{dq}{dt} \right)^2 + \left(\frac{q}{c} - a \right) \frac{dq}{dt} = 0.$$

Par intégration et simplification, on a

$$(6) \quad q = ac + (q_0 - ac) e^{-\frac{r}{2p}t} \cos \cdot \frac{t}{\sqrt{pc}}$$

La décharge est oscillante et son temps d'oscillation est

$$\tau = 2\pi \sqrt{pc}$$

qui est par conséquent le même que dans les oscillations d'un circuit sans étincelle. Cela nous permet de calculer les amplitudes et nous obtenons :

$$(7) \quad \begin{array}{ll} \text{I amp.} & q_0 \\ \text{II amp.} & q_1 = q_0 e^{-\frac{r\tau}{4p}} - ac(1 + e^{-\frac{r\tau}{4p}}) \\ \text{III amp.} & q_2 = q_1 e^{-\frac{r\tau}{4p}} - ac(1 + e^{-\frac{r\tau}{4p}}) \\ & \text{etc...} \end{array}$$

Dans le cas $r = 0$ c'est-à-dire s'il n'y a aucune résistance dans

le circuit, les amplitudes deviennent

$$\begin{aligned}
 & q_0 \\
 (8) \quad & q_1 = q_0 - 2ac \\
 & q_2 = q_1 - 2ac = q_0 - 4ac \\
 & \vdots \\
 & q_n = q_0 - 2nac
 \end{aligned}$$

Ces calculs montrent que dans les circuits à petite résistance, le décrement n'est pas constant, mais augmente avec la diminution de l'amplitude; la courbe d'amplitude est une ligne droite, qui tend vers la courbe exponentielle lorsqu'on augmente la résistance. Ces résultats sont en parfait accord avec les oscillogrammes¹.

Les élèves de Heydweiller ont développé plusieurs méthodes pour déterminer les constantes a et b de l'étincelle; celle étudiée par Kamerase² est assez intéressante.

Dans le cas d'une chute d'amplitude linéaire (petite résistance), on a selon (8) pour la dernière amplitude

$$q_n = q_0 - 2nac.$$

Si l'oscillation cesse quand l'amplitude est égale à zéro on arrive à

$$q_0 - 2nac = 0$$

$$a = \frac{v_0}{2n},$$

ou v_0 est le potentiel maximum.

« n » nombre d'oscillations après lesquelles v_0 tombe à zéro. Kamerase a déterminé le nombre « n » en photographiant le miroir rotatif pendant les décharges, et a mesuré les potentiels maxima au moyen du voltmètre de Heydweiller. Il trouve pour les décrets moyens (formule Heydweiller) des valeurs assez probables et les valeurs de a c'est-à-dire du voltage efficace sont proportionnelles à la longueur de l'étincelle.

¹ Voir plus haut, p. 63.

² KAMERASE, S. Inaugural Dissertation, Rostock (1915).

CHAPITRE II.

DISPOSITIF.

Après de nombreux essais, j'ai adopté définitivement le dispositif suivant :

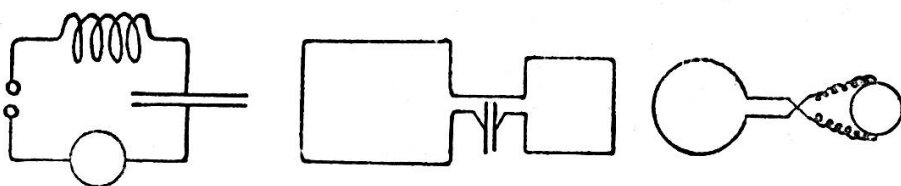


Fig. 1.

Le circuit à étincelle était formé d'un éclateur à vis micrométrique aux bornes duquel les condensateurs à gaz sous pression étaient reliés par des barres de cuivre. Ces barres formaient un rectangle fixe de 72×62 cm, maintenu par des agrafes sur un cadre en bois dur; on pouvait, en enlevant des segments appropriés, intercaler au besoin un ampèremètre à haute fréquence et une self-induction. Les barres plates, d'une largeur de 2 cm et d'une épaisseur de 0,2 cm avaient été argentées pour augmenter la conductibilité superficielle et éliminer en même temps l'accroissement de résistance dû à l'oxydation de la couche superficielle du cuivre. Ce dernier facteur était d'autant plus important que la fréquence utilisée était élevée.

L'éclateur qui portait les électrodes était monté sur des colonnes d'ébonite, de façon à ce que le rapprochement ou l'éloignement des électrodes par une vis micrométrique n'apportât aucun changement dans la position des barres et par conséquent laissât constante la valeur de la self-induction. Dans ce but, une des extrémités du rectangle est reliée à l'électrode fixe. La colonne qui porte l'électrode mobile est munie d'une barre métallique en contact avec l'électrode. Pendant le déplacement, cette barre coulisse dans une pièce métallique portée par une

troisième colonne d'ébonite et à laquelle est fixée l'autre extrémité du rectangle.

Comme il a été dit plus haut, les condensateurs étaient du type Wien; exécutés par le mécanicien Cramer à Danzig¹, ils ne donnaient pas de pertes. Remplis d'acide carbonique à la pression de 20 atm., ils supportaient une tension d'environ 35 000 volts par élément. L'isolation extérieure en ébonite n'étant pas suffisante pour empêcher les effluves, on a coulé de la paraffine à tous les endroits où celles-ci se produisaient.

Une bobine d'induction Klingelfuss alimentée par le courant alternatif de la ville (50 périodes) produisait la tension voulue².

La self-induction d'un diamètre de 72 cm comprenait deux spires de fil de cuivre argenté de 4 mm de diamètre écartées de 6 cm.

Le circuit secondaire se trouvait sur une table munie de petites roulettes pour permettre un changement facile du couplage et le rendre suffisamment lâche. A côté d'une self, faite d'une bande de cuivre (15 mm \times 1,5 mm) en forme de cadre quadrangulaire ($a = 1$ m) monté sur bois, il comprenait deux condensateurs réglables à air en parallèle. Entre les condensateurs et le cadre était intercalé un cadre de plus petites dimensions ($a = 16$ cm, $2 = 0,8$ cm) servant au couplage avec le circuit de mesure.

Ce dernier était constitué par une selfinduction (3 spires d'un diamètre de 24 cm), un thermoélément (dans le vide), ayant une résistance d'environ 1Ω , et d'un galvanomètre. La résistance du circuit était donc très petite par rapport à l'inductance et par conséquent l'amplitude du courant induit était proportionnelle à celle du courant inducteur. Le couplage du circuit de mesure avec le circuit secondaire était assez lâche pour ne pas augmenter le décrément δ_2 ce qui a été vérifié par l'addition d'un second circuit avec thermoélément et galvanomètre). Le circuit de mesure était installé assez loin du primaire pour ne pas avoir, au galvanomètre, une déviation directement induite³.

¹ Description chez M. WIEN. *Ann. der Physik.*, 29, p. 681 (1909).

² La bobine était suffisamment éloignée du circuit pour ne pas l'influencer par sa masse métallique.

³ Un autre moyen beaucoup plus efficace consiste à placer le petit cadre

Comme il a été dit plus haut, le courant était produit par une bobine d'induction alimentée par le courant alternatif de la ville, 50 périodes. Ce mode d'alimentation du circuit n'est pas le meilleur, mais c'est le seul qui était à ma disposition. En général, le réglage pour obtenir des décharges régulières était très laborieux. Pour le réglage et l'étude des propriétés du circuit, je me suis servi de trois appareils : d'un compteur d'étincelles, de l'ampèremètre à haute fréquence et du circuit secondaire.

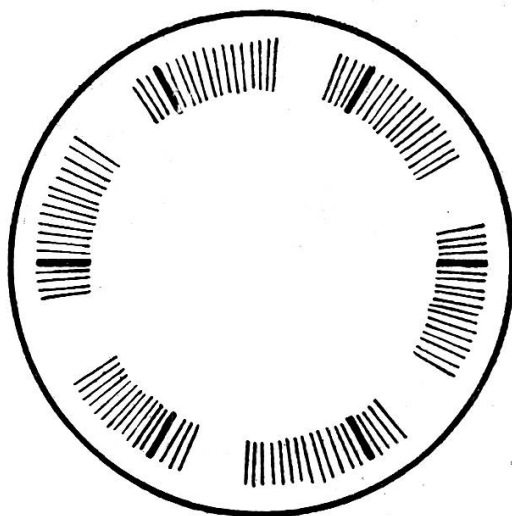


Fig. 2.

Le compteur (Fleming) consiste en un tube à électrodes extérieures rempli de néon. Les deux électrodes sont réunies aux bornes de l'éclateur (pour les étincelles de 1 cm à 4 cm, une électrode était mise à la terre). Le tube était monté sur un disque dont on règle la vitesse, de façon à observer un tableau lumineux immobile. Le nombre de traits lumineux observés, multiplié par le nombre de tours, donne la quantité d'étincelles par seconde. Pour une vitesse du moteur de 1000 tours/min., on observait 6 groupes lumineux correspondant à 100 étincelles, c'est-à-dire une par alternance, le courant de la ville étant à 50 périodes. Il faut remarquer, ce qui a une certaine importance, que le tableau lumineux était en réalité plus complexe (voir fig. 2). L'image correspondant à une étincelle

qui sert au couplage avec le circuit de mesure, ainsi que le circuit de mesure lui-même, dans un plan perpendiculaire au plan du circuit inducteur.

par alternance n'était pas simple ; on avait, par exemple, sur le disque 6 groupes, comprenant chacun un grand nombre de traits parallèles, parmi lesquels celui qui correspondait à l'étincelle était de beaucoup le plus lumineux. Celui-ci ne se trouvait pas en tête du groupe, mais était précédé de plusieurs lignes¹. Le nombre des lignes était assez considérable (environ une trentaine), de sorte que chaque groupe avait, sur notre dispositif, une longueur d'environ 10-12 cm, la distance entre chacun des groupes successifs étant de 2-3 cm. Si on augmente

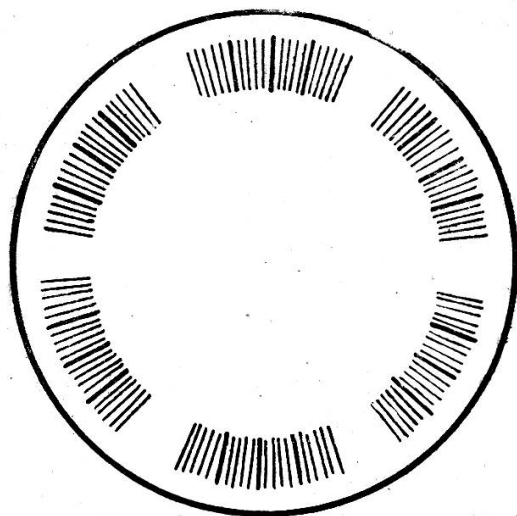


Fig. 3.

la longueur de l'étincelle (et par conséquent la tension), les lignes de faible intensité, qui forment les groupes, devenaient plus lumineuses. Le nombre des lignes formant un groupe et leur distance rapprochée ne permettaient pas de les dénombrer. Ces lignes faibles et nombreuses sont probablement dues aux décharges du circuit formé par la capacité et de la self du secondaire de la bobine d'induction. Une augmentation du courant primaire (et par conséquent de la tension) avait pour effet d'accroître le nombre des lignes de grande intensité dans chaque groupe, sans que le nombre de groupes augmente, en même temps, le bruit produit par les décharges changeait.

¹ Il était facile de se convaincre que les lignes fortes correspondaient à l'étincelle, si la tension de la bobine n'était pas suffisante pour produire l'étincelle, on observait les mêmes groupes de lignes, mais dépourvus de la ligne intense.

Dans ce cas, les nouvelles lignes avaient une intensité presque égale entre elles (mais cependant plus petite que l'intensité de la ligne primitive qui correspondait à une unique étincelle). Il est évident qu'il s'agissait dans ce cas d'étincelles partielles (voir fig. 3). On appelle partielles, les étincelles produites lorsque le courant primaire est trop élevé. Les nombreuses décharges empêchent la désionisation de la distance explosive et se font à une tension inférieure ; de là apparaissent sur le disque des traits lumineux d'intensité plus faible, correspondant aux étincelles partielles. Les traits qui leur correspondent sont espacés et séparés par plusieurs lignes faibles (voir fig. 3). Remarquons en passant que le disque était un excellent appareil de contrôle pour vérifier la régularité des décharges.

Dans ces mesures, le nombre d'étincelles était de 50 (1 pour 2 alternances). Dans ce cas, sur les 6 groupes des lignes faibles (vitesse du moteur 1000 tours/min.), 3 seulement comprenaient en alternant, une raie de grande intensité.

L'ampèremètre thermique (Hartmann & Braun) à haute fréquence, inséré dans le circuit de l'étincelle constitue le second moyen de contrôle¹. Il m'a permis d'éliminer une importante cause d'erreur. En effet, on attribue, dans divers travaux, les mauvais résultats des mesures du décrétement à l'échauffement des électrodes ; mais je n'ai trouvé nulle part des moyens d'élimination complète de ce phénomène. En installant un soufflage assez fort (qui d'ailleurs était nécessaire pour que les décharges ne deviennent pas inactives par formation d'arc, j'ai pu me convaincre que l'ampèremètre indiquait toujours la même valeur, quelle que soit la durée du passage du courant. Sans soufflage, le courant diminue de 20-25 % après une minute². Il faut encore remarquer que l'aiguille de l'ampèremètre oscillait toujours un peu, la période et le décalage du courant de la ville n'étant pas constants et le courant à haute fréquence, peut-être pas tout à fait quasi-stationnaire. L'ampèremètre ne

¹ On a pu voir tout de suite, par exemple, l'impossibilité des décharges régulières avec des électrodes de laiton.

² MACKU signale la même difficulté (observée du circuit de mesure), MACKU *Ann. der Physik*, 34 p. 957, (1911).

se trouvait en circuit que pour le réglage et la mesure du courant efficace ¹.

Enfin, le troisième moyen de réglage était constitué par le circuit de mesure, qui permettait de tracer la courbe de résonance selon Bjerkness ; il a permis de constater dans les condensateurs la présence d'effluves, qui ont été ensuite éliminées.

Les indications des trois appareils que nous venons de décrire permettaient de régler les décharges au moyen d'une self à noyau de fer et de résistances au primaire de la bobine. Le nombre d'étincelles employées était de 50 par seconde, c'est-à-dire une par période. En augmentant le courant primaire dans la bobine, on arrivait à 100 et au stade des étincelles partielles.

Signalons une autre difficulté. En faisant varier le courant primaire, on trouvait une fois, pour un courant plus faible, une fois pour un courant plus fort que celui qui correspondait à 50 étincelles par seconde, un état stationnaire dans lequel la raie lumineuse (correspondant à une étincelle) se déplaçait alternativement d'un groupe au groupe voisin. Pour les faibles intensités, ce phénomène se produisait pour une valeur du courant peu supérieure à celle pour laquelle les étincelles cessent tout à fait de jaillir. On serait donc porté à croire que les étincelles sont comme arrachées et qu'on a un équilibre instable dans lequel une faible augmentation du courant primaire permet à l'étincelle de passer. Cette dernière pourra prendre naissance tantôt sur une alternance positive, tantôt sur une alternance négative. On devrait donc admettre qu'elles sont intermittentes. Cette interprétation est moins adéquate au cas où l'intensité est supérieure à celle qui correspond à 50 étincelles. Il faudrait admettre alors que le courant est trop grand pour 50 étincelles et trop petit pour 100 et que le nombre des étincelles passe alternativement de 50 à 100. L'ampèremètre montre, en effet, à ce moment, un courant plus élevé, mais l'aiguille oscille et fait constater des variations de plusieurs ampères.

¹ J'ai observé que sa présence dans le circuit augmentait le décrétement d'environ 10 %, augmentation ne provenant pas uniquement de sa résistance, 0,038 Ω , mais surtout d'une plaque de fonte faisant partie de sa boîte métallique.

Pour éviter d'effectuer les mesures dans ces conditions instables, j'ai déterminé pour chaque réglage, les intensités correspondant à ces deux points critiques et j'en ai pris la valeur moyenne comme valeur de l'intensité de régime, ainsi une variation accidentelle au primaire me laissait suffisamment éloigné de cet état. Cette précaution m'a permis d'éliminer quelques difficultés qui s'étaient présentées dans les expériences préliminaires.

Le potentiel maximum a été mesuré par la distance explosive entre deux sphères de 2 cm, de diamètre, en laiton. Le micromètre était placé dans le voisinage immédiat du circuit. Les bornes de ce dernier ont été reliées aux sphères du micromètre par de larges bandes de cuivre de 40 cm de longueur, disposées de façon à avoir une self-induction minimum. La distance de 40 cm a dû être adoptée à cause de la présence d'une masse considérable de fer dans le support du micromètre. Les retards à la décharge (Warburg) étaient éliminés en éclairant les sphères du micromètre par une lampe à mercure¹. En même temps, j'ai tenu compte des précautions recommandées par Rappel² en nettoyant les électrodes avec du papier à l'émeri. Les sphères étaient rapprochés lentement, jusqu'au moment où jaillissait la première étincelle. A ce moment-là, on interrompait le courant. Les valeurs du potentiel ont été tirées des tables de Weicker³. Il se pourrait que les valeurs de Weicker ne fussent

¹ Qu'il me soit permis de décrire ici une simple expérience démontrant la nécessité de cet éclairage pour des mesures précises. Dans un dispositif Tesla, les oscillations étaient produites par des étincelles lentes (1 par 2 secondes) obtenues en chargeant les condensateurs à l'aide d'un système plaque et pointe, la bobine était actionnée par l'interrupteur Wehnelt. On pouvait donc facilement compter les étincelles. Le dispositif Tesla était pourvu de deux déchargeurs — l'un dans le primaire et le second en parallèle sur la capacité du secondaire qui était en résonance avec le primaire. La distance explosive du second déchargeur étant déterminée, les étincelles auraient dû jaillir en nombre égal dans les deux déchargeurs. Or, pour 100 étincelles primaires, on n'en observait que 70-75 au secondaire. En éclairant simplement le déchargeur avec une lampe à mercure, aucune étincelle secondaire ne fait défaut.

² U.-J. Rappel. Thèse, Fribourg, 1909.

³ W. WEICKER, Dissertation, Dresden 1910. Aussi *Elektrotechnische Zeitschrift*, 32, p. 436 (1911).

pas tout à fait applicables à mon cas, étant donné que pour les mesures, il n'a pas employé les rayons ultra-violet. Mais la concordance et la régularité des résultats de Weicker sont une garantie que ses nombres pouvaient être employés dans cette étude, d'autant plus qu'il était plus important pour moi de connaître les valeurs relatives, que les valeurs absolues.

MESURES ET PROCÉDÉS.

Le réglage des décharges étant parfaitement en main, grâce aux trois moyens de contrôle décrits plus haut, j'ai passé à l'exécution des mesures. Elles ont été faites par séries.

J'ai déterminé premièrement dans un circuit dont la longueur d'onde était de 246 m (une self et deux groupes en série de deux condensateurs en parallèle), les décréments pour les différentes distances explosives choisies, et cela pour chaque métal. Dans une seconde série de mesures, l'ampèremètre, dont la présence dans le circuit ne changeait pas la longueur d'onde, m'indiquait le courant efficace d'une façon suffisamment exacte pour chacun des cas réalisés dans la première série. Enfin, pour la mesure des différents voltages maxima, l'ampèremètre était enlevé et un micromètre à sphères de laiton de 2 cm de diamètre était branché aux bornes du déchargeur où il fallait évaluer le potentiel maximum.

Ensuite, procédant toujours de la même façon, les mesures ont été effectuées dans le même circuit dont la self-induction était réduite, la longueur d'onde étant alors 132 m et pour les électrodes de Mg.

De plus, les mesures de décrement ont été effectuées pour les mêmes électrodes de Mg. avec les quatre condensateurs, mis en parallèle et la self encore diminuée, longueur d'onde comme plus haut 246 m.

Le décrement était déterminé en faisant trois lectures de capacité : la première C_0 correspondant à la résonance et deux autres C_1 et C_2 telles que $C_1 < C_0 < C_2$, pour C_1 , et C_2 l'indication du galvanomètre était la moitié de l'indication maximum ;



somme des décréments était calculée par la formule

$$\delta_1 + \delta_2 = \frac{\pi(C_2 - C_1)}{2 \cdot C_0}.$$

En général, cette mesure était exécutée 3 fois. Pour que les décharges (qui usaient les électrodes) soient de faible durée, la capacité C_1 , C_2 a toujours été déterminée approximativement dans un premier essai. Le maximum de résonance (capacité C_0) a toujours été déterminé avec rigueur. Il a été fait de même chaque fois 3 lectures du courant et 2 de la distance explosive au micromètre. En général, les mesures étaient concordantes. Dans les quelques cas où elles ont présenté de légères divergences, j'ai pris comme résultat, la moyenne des valeurs observées.

Toutes ces mesures ont été faites exactement dans les mêmes conditions. Premièrement, les électrodes étaient nettoyées avec du papier à l'émeri, ensuite le courant primaire réglé pour qu'à la distance explosive donnée, il se produise 50 étincelles par seconde, ce qui était rigoureusement contrôlé chaque fois au compteur. Ce contrôle se faisait immédiatement après le nettoyage; pendant la mesure, le compteur était supprimé pour éviter une perte d'énergie; on pouvait admettre que l'état des électrodes ne subissait pas de changements appréciables. On contrôlait de même, avant chaque mesure, si le couplage entre les deux circuits était suffisamment lâche. Une partie de la chambre était rendue obscure pour faciliter l'observation du compteur, tandis que le circuit de décharge était exposé à la lumière du jour. Pendant les mesures du potentiel, la distance explosive du micromètre était éclairée par le rayonnement d'une lampe à mercure en quartz, dont le micromètre de décharge était préservé.

Il faut, pour tracer les caractéristiques statiques de l'étincelle connaître les valeurs efficaces du courant et de la différence du potentiel.

Le courant efficace était indiqué par l'ampèremètre à haute fréquence, dont il a déjà été question. L'étalonnage de cet appareil a été fait par comparaison avec un instrument normal en courant continu.

Le calcul du potentiel efficace présentait beaucoup plus de difficultés. Barkhausen¹ et Heydweiller² démontrent dans le cas d'un circuit à étincelle linéairement amortie, la formule

$$a = \frac{v_0(\max)}{2n}$$

dans laquelle v_0 est le potentiel maximum et n le nombre d'oscillations du train d'onde produit par une étincelle.

J'ai choisi la formule du décrétement établie empiriquement par Heydweiller.

$$(4) \quad \delta = 1,4 \log \text{nat} \frac{v_0 - a}{v_0 - 3a}.$$

Les valeurs mesurées du décrétement et du potentiel maximum donnaient immédiatement par calcul le potentiel efficace a .

Heydweiller fait remarquer que cette dernière formule donne un décrétement plus grand que celui qu'on obtient par la méthode de Bjerkness. Il prétend que dans celle-ci, on trouve un effet proportionnel au carré des amplitudes; les premières amplitudes moins amorties que les suivantes prenant de ce fait une importance plus grande, la valeur du décrétement qui en résulte est plus petite. Je crois que seul un oscillogramme très précis permettrait de juger s'il en est ainsi (et d'évaluer la valeur du potentiel efficace). Toutefois, les valeurs — en général beaucoup plus grandes que les miennes et que celles des autres auteurs — que Heydweiller calcule théoriquement, donnent des courbes qui ont qualitativement la même allure que celles que j'ai construites. De plus, un de ses élèves, Kamerase, a déterminé par la formule ci-dessus, pour des circuits comprenant une faible résistance, des décrétements qui se rapprochent beaucoup plus des valeurs obtenues par la méthode Bjerkness.

Ces considérations justifient dans mon cas l'emploi de cette formule, quoique les décrétements aient été déterminés par la formule de Bjerkness.

(A suivre).

¹ BARKHAUSEN. *Physikalische Zeitschrift*, 8, p. 626 (1907).

² HEYDWEILLER. *Ann. der Physik*, 25, p. 48 (1908).

³ *Ibid.*, p. 54 (1908).