

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

Artikel: Décharge disruptive dans l'azote aux pressions élevées
Autor: Hammershaimb, G. / Mercier, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-741084>

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>

DÉCHARGE DISRUPTIVE
DANS
L'AZOTE AUX PRESSIONS ÉLEVÉES
PAR MM.
G. HAMMERSHAIMB et P. MERCIER

I. — INTRODUCTION.

L'étude de la variation du potentiel explosif avec la longueur d'étincelle, la pression du gaz et la courbure des électrodes a fait l'objet de nombreuses recherches. Le travail le plus important au point de vue de la théorie de la décharge disruptive dans un champ uniforme est celui de F. Paschen¹. La conclusion qui en résulte est connue sous le nom de Loi de Paschen et peut s'exprimer ainsi : A température constante, le potentiel disruptif ne dépend que du produit de la pression par la longueur d'étincelle :

$$V = f(p \cdot d)$$

ou en d'autres termes, de la masse du gaz comprise entre deux surfaces d'électrodes égales à l'unité en admettant que le libre parcours moyen des molécules est inversement proportionnel à la pression. La théorie de l'ionisation par choc, due principalement aux recherches de MM. J.-J. Thomson, Townsend, Langevin et Bouty est venue expliquer depuis le mécanisme de la décharge disruptive. Si bien des problèmes ont été résolus, il reste cependant des domaines encore peu explorés et la simpli-

¹ PASCHEN, F. *Wiedemann Annalen*, t. 37, p. 69, 1889.

cité du phénomène est parfois plus apparente que réelle. Telle est, en particulier, la question de savoir dans quelles limites de pressions la loi de Paschen reste applicable, et dans quelle mesure la forme des électrodes intervient dans la discussion des résultats.

Les travaux effectués aux pressions élevées sont relativement peu nombreux. Les divers expérimentateurs arrivent à des conclusions différentes, les uns trouvent la loi de Paschen vérifiée pour toutes les pressions, les autres seulement pour des pressions inférieures à 10 atmosphères. Cette divergence des résultats paraît tenir dans une certaine mesure à la forme des électrodes employées, aussi était-il intéressant d'étudier systématiquement quelle est l'influence de la forme et de la grandeur des électrodes sur le phénomène de la décharge disruptive.

Au Laboratoire de Physique de l'Université de Genève, deux travaux de recherches ont été faits ces dernières années sur le potentiel disruptif aux pressions élevées dans l'acide carbonique. Le premier¹, effectué en utilisant de petites électrodes planes de 14 mm de diamètre avait montré que la loi de Paschen mise sous la forme $V = f(m \cdot d)$, où m est la masse du gaz entre les électrodes et d la distance explosive, était assez bien vérifiée par les expériences dans les limites de pressions où elles étaient effectuées. Dans le second travail², qui était fait avec une plus grande précision, les auteurs utilisaient des électrodes planes de 45^{mm} de diamètre et trouvèrent, que pour les fortes pressions, le potentiel croît moins rapidement que la pression n'augmente, mais pour les grandes distances de 2 à 5 mm et des pressions inférieures à 10,5 atmosphères, la loi de Paschen est assez bien vérifiée. Il convenait donc de reprendre cette étude en faisant varier largement les conditions expérimentales.

Dans ce but nous avons fait une étude systématique en utilisant des électrodes de forme et de grandeur différentes à des pressions allant jusqu'à 50 atmosphères. Nous avons utilisé 13 paires différentes d'électrodes, dont 8 calottes sphériques, 4 plateaux et une paire de pointes. Pour augmenter la précision des mesures nous avons apporté d'importants perfectionne-

¹ GUYE, C.-E. et STANCESCU, C. *Arch.* 1917, vol. 43, février.

² GUYE, C.-E. et MERCIER, P. *Arch.* 1920, janvier-mars.

ments au dispositif expérimental qui ont permis en outre de travailler à des potentiels beaucoup plus élevés que précédemment. Pour cette étude nous avons préféré choisir l'azote plutôt que l'acide carbonique, car les résultats dans ce premier gaz sont d'une façon générale plus réguliers et plus constants que dans l'acide carbonique.

II. — LES TRAVAUX ANTÉRIEURS.

A. — *Expériences dans les gaz comprimés.*

1889, M. WOLF¹, dans H_2 ; O_2 ; N_2 ; CO_2 ; pression max. 10 atm; et jusqu'à 19000 volts; distance $d = 1$ m/m, électrodes sphériques de 10 cm de diamètre.

Résultat : Le potentiel explosif V croît proportionnellement avec la pression p .

1902, A. DE HEMPTINNE², dans H_2 ; O_2 ; N_2 ; CO_2 ; $p_{\max.} = 50$ atm. et de très petites distances. Electrodes : fil de platine de 0,2 m/m de diamètre.

Résultat : V croît proportionnellement avec p .

1905, C.-E. GUYE et H. GUYE³; dans H_2 ; O_2 ; N_2 ; CO_2 ; Air; $p_{\max.} = 86$ atm; jusqu'à 19500 volts; distance explosive $d = 0,18$ m/m.

Electrodes : fil de platine de 1 m/m de diamètre.

Résultat : de 1 à 10 atmosphères, V est proportionnel p .

Au-dessus de 10 atmosphères, $\frac{V}{p}$ va en diminuant.

1907, L. CASSUTO et A. OCCHIALINI⁴, dans l'air; $p_{\max.} = 100$ atm.

Distances explosives de 0,1 à 0,32 m/m. Electrodes : plateaux bombés de 40 mm de diamètre.

Résultat : La loi de Paschen est vérifiée jusqu'à 100 atm. Cependant les écarts observés dans la seconde série paraissent déceler une variation systématique du produit $p \cdot d$.

¹ WOLF, M. *Wiedemann Annalen*, t. 37, p. 306, 1889.

² HEMPTINNE, A. *Bulletin des Sciences de l'Académie de Belgique*, 8, p. 603, 1902.

³ GUYE, C.-E. et GUYE, H. *Arch.* 1905, juillet et août.

⁴ CASSUTO, L. et OCCHIALINI. A. *Nuovo cimento*, (5), 14, p. 330, 1907.

1909, E.-A. WATSON¹, dans l'air; $p_{\max} = 16$ amosphères; distance variable, électrodes sphériques de différente grandeur;

Résultat : V croît proportionnellement avec p .

1909, G. CERUTI², dans l'air, $p_{\max} = 50$ atm, et jusqu'à 25000 volts. Distance $d = 0,031$ à $0,375$ mm; électrodes sphériques de 15 m/m de diamètre.

Résultat : V croît plus rapidement que la pression p .

1914, F. HAYASHI³ dans H_2 , O_2 , N_2 ; CO_2 ; Air; Gaz; $p_{\max} = 75$ atm; et jusqu'à 110000 volts, distances $d = 0,52$ à $1,82$ mm; électrodes sphériques de 10 mm de diamètre.

Résultat : jusqu'à 10 atm, V croît linéairement avec p .

Au dessus de 10 atm, $\frac{V}{p}$ va en diminuant.

1917, C.-E. GUYE, et C. STANCESCU⁴, dans CO_2 ; $p_{\max} = 53$ atm; jusqu'à 35000 volts. $d = 0,34$ à $2,24$ mm; électrodes planes de 14 mm de diamètre.

Résultat : La loi de Paschen est approximativement vérifiée sous sa forme générale $V = f(m.d.)$.

1920, C.-E. GUYE et P. MERCIER⁵, dans CO_2 ; $p_{\max} = 35$ atm; et jusqu'à 54000 volts; $d = 0,5$ à $5,0$ mm; électrodes planes de 45 m/m de diamètre et calottes sphériques.

Résultat : Jusqu'à 10 atm, la loi de Paschen est vérifiée.

Au dessus de 10 atm, V croît moins rapidement que p .

B. — *Expériences avec différentes électrodes.*

En 1882, J.-B. Baille⁶ a fait un travail sur l'influence de la forme des électrodes, dans l'air, pour des distances de $0,5$ à 10 mm et jusqu'à 34000 volts, à la pression atmosphérique voisine de 760 mm de Hg. Il a utilisé des électrodes sphériques de $0,1$; $0,35$; $0,6$; $1,0$; $3,0$ cm de diamètre, des calottes sphériques de $6,0$ cm de diamètre et une paire d'électrodes planes. C'est le

¹ WATSON, E.-A. *Journ. elect. Eng.*, 43, p. 113, 1909.

² CERUTI, G. *R. Istituto Lombardo Rendiconti II*, 42, p. 446, 1909.

³ HAYASHI, F. *Annalen der Physik* (4), t. 45, p. 431, 1914.

⁴ GUYE, C.-E. et STANCESCU, C. *Arch.* 1917, t. 43, février.

⁵ GUYE, C.-E. et MERCIER, P. *Arch.* 1920, janvier-avril.

⁶ BAILLE, J.-B. *Annales de Chimie et de Physique*, t. 25, 1882.

travail le plus important au point de vue de la forme des électrodes.

Résultats: 1° A distance constante, le potentiel explosif varie avec le diamètre de la sphère, et pour une sphère d'un certain diamètre, le potentiel est maximum. 2° Au fur et à mesure qu'on augmente la distance explosive, le potentiel maximum se produit pour des sphères plus grandes, sans qu'il y ait proportionnalité entre ces deux éléments.

Une série de travaux effectués par Paschen¹, Freyberg², Heydweiller³, Tœpler⁴, Voigt⁵, Müller⁶, Kowalski, Estorff⁷, et d'autres ont vérifié les résultats trouvés par Baille. Les résultats numériques ne concordent pas toujours très bien. Les expériences ayant été faites à la pression atmosphérique, la température, la pression et l'état d'ionisation de l'air ont une influence qui n'est pas négligeable. Cependant les conclusions générales que l'on peut tirer de ces divers résultats sont d'accord avec celles de Baille. M. Tœpler a formulé la règle des champs semblables: Si l'on évalue le potentiel explosif en prenant pour unité le potentiel explosif qui correspond à $d : \phi = 1$, d étant la distance explosive et ϕ le diamètre des sphères, pour un même rapport $d : \phi$, le potentiel explosif est le même et ne dépend pas de la courbure des électrodes.

En 1911, Abraham et Villard⁸ ont fait des mesures jusqu'à 300000 volts à la pression de 760 mm de Hg et 15° et ont trouvé les résultats suivants: 1° Au fur et à mesure que l'on augmente le diamètre des électrodes, la courbe des potentiels explosifs en fonction de la distance se rapproche d'une droite. 2° Entre électrodes planes indéfinies et au dessus de 30000 volts, le potentiel est une fonction linéaire de la distance des électro-

¹ PASCHEN, F. *Loc. cit.*

² FREYBERG, J. *Wiedemann Annalen*, t. 38, p. 231, 1889.

³ HEYDWEILLER, A-D. *Wiedemann Annalen*, t. 48, p. 213, 1893.

⁴ TÖPLER, M. *Annalen der Physik*, t. 10, p. 730, 1903, et t. 19, p. 191, 1906.

⁵ VOIGT. *Annalen der Physik*, t. 12, p. 403, 1903.

⁶ MÜLLER, C. *Annalen der Physik*, t. 28, p. 585, 1909.

⁷ ESTORFF, W. *Forschungshefte auf dem Gebiet des Ing. Wesens*, Heft 199.

⁸ ABRAHAM et VILLARD. *C. R.*, t. 153, p. 1200, 1911.

des. Les auteurs avaient utilisé des électrodes sphériques de 5,0; 10,0 et 30,0 cm, des pointes et des électrodes planes, les distances variaient entre 0,5 et 60,0 cm.

III. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.

Le dispositif expérimental est celui utilisé par MM. C.-E. Guye et P. Mercier¹. Nous en avons modifié plusieurs parties pour obtenir une précision plus grande et pour atteindre des potentiels plus élevés.

ME Machine électrostatique. — La source d'électricité dont nous disposons, est une puissante machine de Wommelsdorf, à deux plateaux d'ébonite de 55 cm de diamètre, qui tournent dans le même sens. Cette machine peut donner des potentiels supérieurs à 100 000 volts, elle est actionnée par un moteur à courant continu Mo, la vitesse est réglable au moyen d'une résistance. Nous avons intercalé entre le moteur et la machine une transmission T pour avoir une marche plus régulière pour les petites vitesses. Le pôle positif de la machine électrostatique est relié à la terre. Le pôle négatif est relié à l'électromètre et à l'appareil de décharge. Des connexions inverses ne présenteraient pas le même avantage car l'électricité positive a une tendance très marquée à s'échapper par des effluves. Deux disques F munis de balais servent à régler le potentiel, la distance des disques peut être modifiée micrométriquement jusqu'à 35 cm environ.

C Condensateurs. — Au début, nous avons utilisé deux bouteilles de Leyde en cascade, de 22 cm de diamètre et 40 cm de hauteur avec des bords renforcés. Elles avaient une capacité de 0,001 microfarads environ. Pour les hautes tensions, au-dessus de 60 000 volts, il y avait trop d'effluves dans les condensateurs, et la mesure des potentiels était impossible. C'est pour cette raison que nous avons remplacé les bouteilles de Leyde par trois condensateurs sous pression, du type étudié par

¹ GUYE, C.-E. et MERCIER, P. *Loc. cit.*

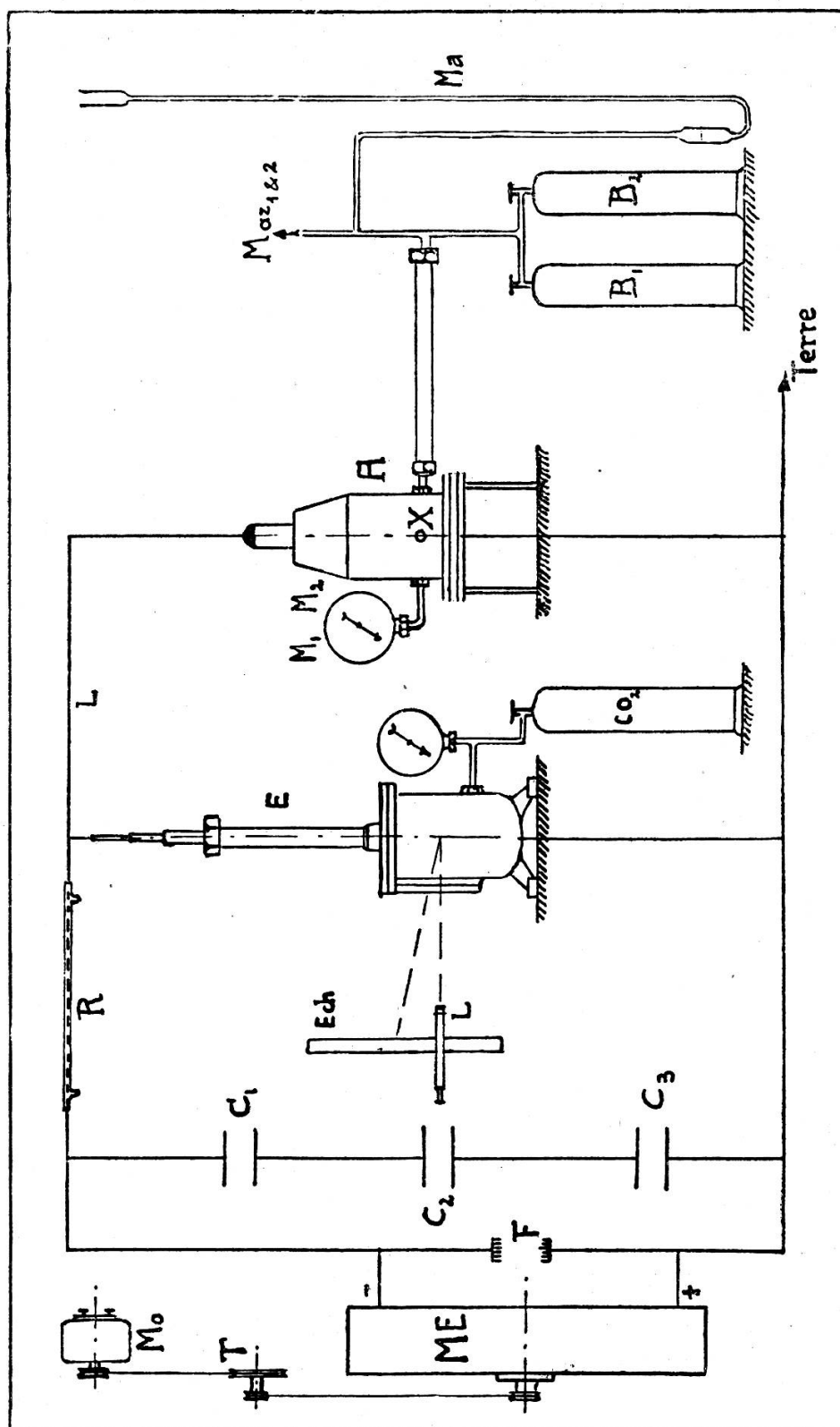


Fig. 1. — Dispositif expérimental.

M. Wien¹ pour supporter les tensions élevées. La capacité est $1,7 \cdot 10^{-3}$ microfarad, le potentiel maximum est 40 000 volts par condensateur. Ils sont remplis d'acide carbonique comprimé à 25 atm.

L *Lignes électriques*. — Elles sont formées de câble fortement isolé au caoutchouc. Pour arriver à de très hautes tensions, nous avons couvert tous les raccords métalliques avec une couche épaisse de glu marine. Une résistance réglable R constituée par un fil de lin plus ou moins mouillé et enfilé dans un tube capillaire séparait les condensateurs de l'appareil à décharge et de l'électromètre et permettait d'éviter d'avoir une décharge trop énergique entre les électrodes.

E *Electromètre*. — Nous avons utilisé pour nos expériences l'électromètre sous pression, imaginé par M. C.-E. Guye et étudié avec M. A. Tcherniawski¹. Nous avons modifié l'aiguille de l'électromètre pour arriver à mesurer des potentiels beaucoup plus élevés. La fig. 2 montre la nouvelle aiguille, elle est plus rigide, les poids sont plus grands et la précision est augmentée par l'emploi de couteaux en acier.

(1) est le plan fixe, il repousse la tige en laiton (2) qui forme la partie supérieure de l'aiguille mobile; celle-ci est soutenue au-dessus de son centre de gravité en A — A par des couteaux en acier (3) qui sont engagés dans des pièces minces en laiton. L'axe supérieur (4) mobile en acier est soudé directement au cadre en laiton (5) qui porte le miroir. Les poids p placés sur un petit plateau qui repose sur des couteaux (6) à 40 mm de distance de l'axe principal, font équilibre à la répulsion électrostatique. Le cadre (7) en aluminium est très rigide, ne permettant pas des flexions de l'aiguille; (8) est l'amortisseur, formé par une feuille mince en aluminium qui plonge dans l'huile de vaseline. L'aiguille est entourée par un cylindre en laiton qui la protège contre les actions électrostatiques extérieures. Ce cylindre porte en haut le plan fixe et contient en bas l'huile pour l'amortissement; enfin ce cylindre est relié par une tige (9) en laiton au fil d'amenée lequel est isolé par des tubes en

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

¹ GUYE, C.-E. et TCHERNIAWSKI, A. *Arch.* 1913, juin.

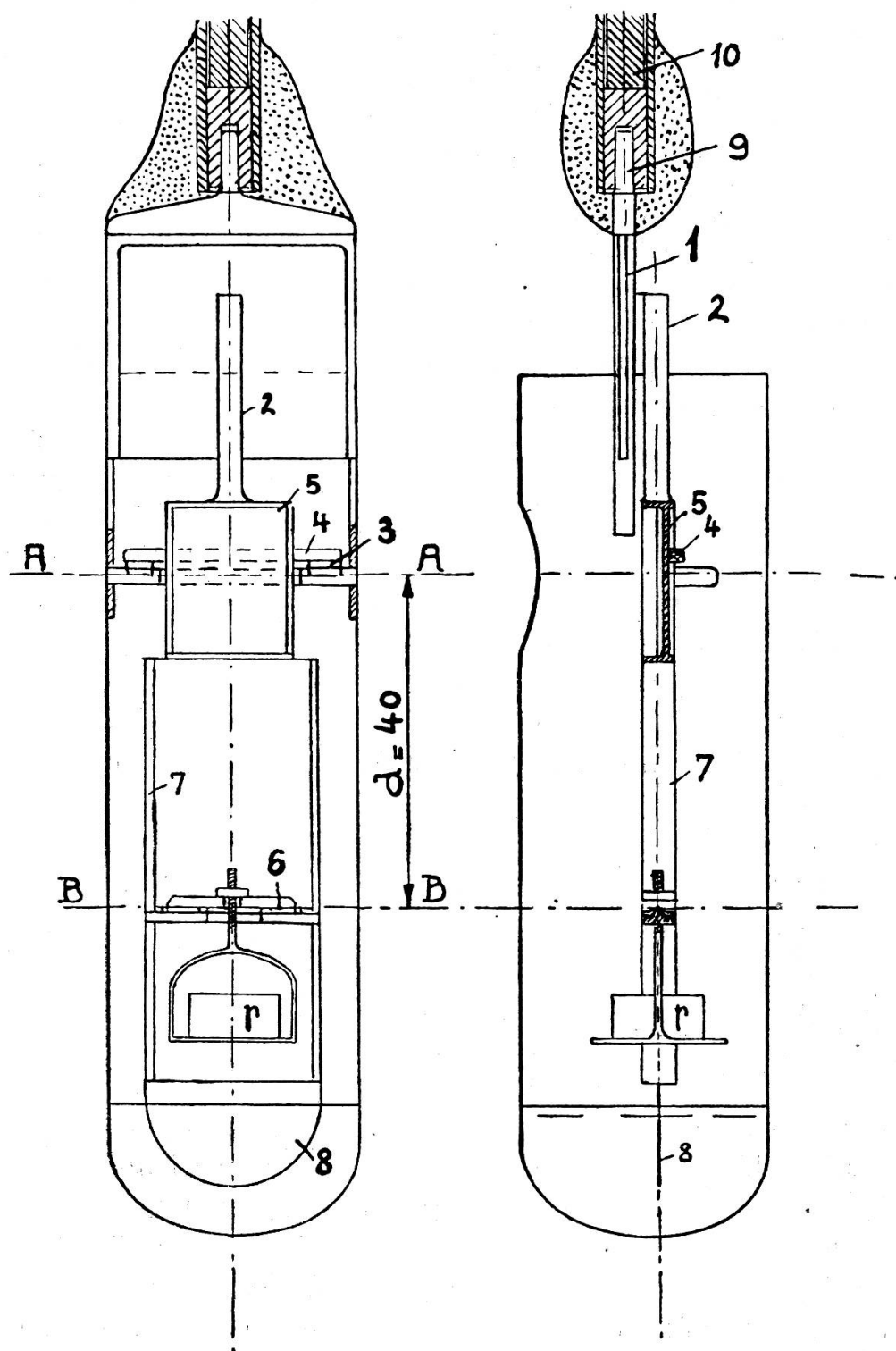


Fig. 2. — Aiguille de l'électromètre.

verre (10) recouverts de glu marine. Toute cette partie de l'électromètre est suspendue dans un récipient fermé, dans lequel la pression est 8,5 atmosphères.

Nous avons étalonné l'électromètre sous pression avec un électromètre absolu de Bichat et Blondlot. La lecture des déviations de l'aiguille se fait par la méthode de Poggendorf, une échelle verticale de 50 cm de longueur placée à une distance de 160 cm du miroir de l'aiguille. L'angle maximum du rayon incident et du rayon réfléchi est 18° pour une déviation de l'aiguille de 9° .

Le centre de gravité de l'aiguille sans surcharge n'étant pas tout à fait dans l'axe A — A, nous avons pris des précautions spéciales pour l'étalonnage. Le moment qui fait équilibre à la répulsion électrostatique peut être considéré comme produit par un poids p' agissant à une distance $AB = d$ de l'axe de rotation de l'aiguille. Nous avons fait un premier étalonnage sans avoir aucune surcharge p sur le plateau. On a la condition d'équilibre pour un angle α :

$$p'd \sin \alpha = C_x V'^2 \quad 1.$$

où pour notre instrument

$$V' = c_x \sqrt{p'} \quad 2.$$

Si l'on fait un deuxième étalonnage en ajoutant une surcharge p agissant également à la même distance d de l'axe de rotation, on a pour la même déviation α un nouveau potentiel V donné par la relation :

$$V = c_x \sqrt{p + p'} \quad 3.$$

Si nous voulons tirer la valeur de p' , il suffit d'éliminer la constante c_x en divisant 3) par 2) ce qui donne la relation

$$\frac{V}{V'} = \frac{\sqrt{p + p'}}{\sqrt{p'}} \quad 4.$$

d'où l'on peut tirer la valeur de p' :

$$p' = p \frac{V'^2}{V^2 - V'^2} \quad 5.$$

Connaissant p' on a la relation générale pour une même déviation et des surcharges différentes p_1 et p_2 :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sqrt{p_1 + p'}}{\sqrt{p_2 + p'}} \quad 6,$$

TABLE 1.

ÉTALONNAGE DE L'ÉLECTROMÈTRE SOUS PRESSION.

A. — *Sans surcharge.*

Elec. Bichat et Blondlot grammes	Electrom. sous pression		Elec. Bichat et Blondlot grammes	Electrom. sous pression	
	Divisions	Volts.		Divisions	Volts
0,10	10,85	5755	0,90	20,6	17260
0,20	11,95	8135	1,00	22,2	18195
0,30	13,0	9965	1,20	25,6	19930
0,40	14,1	11505	1,40	29,7	21525
0,50	15,2	12865	1,50	32,25	22280
0,60	16,35	14090	1,60	35,20	23010
0,70	17,475	15220	1,80	41,3	24410
0,80	18,9	16270	2,00	48,7	25730

B. — *Poids 1,00 gr dans l'électromètre sous pression.*

0,20	11,225	8135	1,00	17,4	18195
0,40	12,6	11505	1,50	22,2	22280
0,50	13,375	12865	2,00	28,5	25730
0,60	14,15	14090	2,50	36,7	28765
0,80	15,75	16270	3,00	49,0	31510

Avec ces valeurs nous avons trouvé $p' = 2,02$ gr pour notre aiguille avec moins de 1,0 % d'erreur. Nous avons fait l'étalonnage également avec les poids de 4, 9, 16 et 25 grammes dans l'électromètre sous pression et nous sommes arrivés à la même valeur de p' avec un écart inférieur à 1,5 %. Nous pouvons ainsi mesurer de très hauts potentiels jusqu'à 100 000 volts avec une grande sécurité et précision.

La pression dans l'électromètre est 8,5 atm. réglée au moyen d'une bonbonne d'acide carbonique et d'une bonbonne tampon. La partie extérieure du récipient est mise à la terre et protégée

la partie chargée de l'intérieur contre toutes les influences extérieures. En outre l'acide carbonique sous pression présente une grande cohésion diélectrique et les phénomènes d'ionisation étant négligeables, la condition qui veut que la densité cubique de l'électricité soit nulle en tout point du diélectrique, est certainement mieux réalisée que dans les électromètres à air libre. Paschen¹ a observé par exemple en été des potentiels 4 % plus bas dans l'air atmosphérique qu'en hiver. Ces divergences tiennent en grande partie à l'ionisation de l'air et sont évitées par l'emploi de l'électromètre sous pression.

A *Appareil à décharge*. — L'appareil à décharge est celui utilisé dans le travail précédent avec quelques modifications. La pièce isolante qui porte l'électrode supérieure était en haefelyte et donnait de bons résultats pour l'isolement, mais il y avait toujours des fuites de gaz et des déformations importantes pour des pressions de 20 à 50 atmosphères. Nous avons remplacé cette pièce par un isolateur en porcelaine² qui nous a donné entière satisfaction. L'appareil est très étanche et il n'a pas été constaté de déformation aux très hautes pressions. La distance explosive contrôlée au moyen d'une lunette à oculaire micrométrique n'a pas varié pendant les mesures; ce fait importe beaucoup pour l'exactitude des mesures aux hautes pressions.

Pression. — Pour mesurer la pression, nous avons adapté à la chambre à décharge un raccord en laiton qui porte deux manomètres métalliques.

Le gaz. — Nous avons utilisé l'azote qui donne des résultats très réguliers et ne s'écarte pas beaucoup de la loi de Boyle-Mariotte. L'azote, fourni en bonbonnes par la Sauerstoff et Wasserstoffwerk, Lucerne A. G. était garanti à 98 % de pureté et les résultats obtenus avec les différentes bonbonnes utilisées ont présenté une très bonne concordance. La mesure des pressions se fait jusqu'à 4 atmosphères au moyen d'un manomètre à air libre, et au delà à l'aide de deux manomètres métalliques de précision, du type employé à Berne au Bureau des Poids et Mesures. Ces deux manomètres peuvent être contrôlés au moyen

¹ PASCHEN, F. *Loc. cit.*

² Pièce fournie gracieusement par la maison Gardy de Genève.

de manomètres à azote, utilisés dans le travail précédent et construits d'après les indications données par Amagat ¹.

Les expériences ont été faites à la température ordinaire de la salle, qui n'a varié que très peu ; la valeur moyenne de cette température est 20° C.

IV. — OPÉRATIONS PRÉLIMINAIRES.

Les expériences se faisant en espace clos, il devient impossible naturellement d'utiliser des sphères de grand diamètre à moins d'employer des appareils encombrants dont la résistance aux pressions élevées serait sujette à caution. Observons d'ailleurs que le potentiel disruptif croît rapidement avec la pression, et qu'ainsi les distances explosives que nous pourrions étudier seront toujours faibles par rapport au diamètre des électrodes. C'est pour cette raison que nous avons choisi comme matériel des calottes sphériques et des plateaux à bords incurvés. Pour les très petites distances, les calottes sphériques donnent sensiblement les mêmes résultats que des sphères complètes. Les électrodes sont toutes en cuivre sauf les électrodes planes de grand diamètre utilisées déjà dans le travail précédent et qui sont recouvertes d'une feuille d'or 14 carats de 0,6 mm d'épaisseur. L'électrode supérieure est vissée dans un cône en laiton engagé dans la pièce de porcelaine ; ce cône sert à assurer l'étanchéité du joint pour le gaz comprimé. L'électrode inférieure est vissée sur un écrou dont on peut faire varier micrométriquement la distance par rapport à l'électrode supérieure. Un index et un tambour divisé servent à mesurer la distance ; un tour complet, correspondant à 100 divisions du tambour, écarte les électrodes de 1 mm. Il est ainsi facile de déterminer la distance des électrodes soit par le procédé du contact électrique, soit par le simple contact mécanique avec une erreur inférieure au centième de mm.

Nous avons pris des précautions spéciales pour régler le paral-

¹ AMAGAT. *Annales de Chimie et de Physique*, t. 19, 1880 ; t. 22, 1881 ; t. 28, 1883.

lélisme des électrodes planes. L'électrode inférieure était enduite d'un peu de rouge à polir délayé dans une goutte d'huile et rapprochée de l'électrode supérieure jusqu'au contact. La trace laissée sur celle-ci indiquait les corrections à faire pour obtenir le parallélisme et l'on y parvenait en glissant sous l'électrode supérieure à l'endroit convenable de petites cales constituées par de minces feuilles de cuivre.

Les distances explosives étaient étudiées de 0,5 en 0,5 mm entre les limites de 0,5 et 5 mm. Pour les calottes sphériques qui sont un peu plus épaisses, nous avons fait varier la distance seulement jusqu'à 4 mm. Les petites distances aux fortes pressions donnent les résultats les plus intéressants. Après les expériences, nous avons constaté chaque fois que la distance des électrodes n'avait pas changé. Une fois la distance réglée, l'appareil est fermé avec un écrou en laiton muni d'un joint en plomb. Une lunette munie d'un oculaire à micromètre permettait de contrôler la distance des électrodes aux fortes pressions et de constater éventuellement la présence de poussières.

Les électrodes, bien polies avant les mesures, sont nettoyées avec de l'alcool, pour avoir des surfaces très propres. Nous avons utilisé les électrodes suivantes :

A. Electrodes planes à bords incurvés.

Numéro des électrodes.	I	II	III	IV
Diamètre total en mm	45	25	15	10
Diamètre de la surface plane	30	20	10	8

B. Electrodes en forme de calottes sphériques.

Numéro des électrodes.	V	VI	VII	VIII
Diamètre de courbure mm	300	240	180	120

Numéro des électrodes	IX	X	XI	XII
Diamètre de courbure mm	60	30	20	15

C. Une paire de pointes en acier.

L'angle des pointes a 12 degrés environ. Nous avons utilisé les pointes seulement pour les expériences à la pression atmosphérique.

L'épaisseur des électrodes varie entre 5 et 8 mm. Elles sont soigneusement centrées.

Pour avoir dans l'appareil le même gaz que dans la bonbonne, nous avons fait circuler dans la canalisation un courant d'azote, puis nous avons fait le vide dans l'appareil au moyen d'une pompe de Gaede et l'avons rempli ensuite avec de l'azote. Cette opération était répétée deux fois de sorte que nous avions pratiquement le même gaz dans l'appareil et dans la bonbonne.

Pour éviter le retard disruptif étudié par Warburg¹, nous avons utilisé une source ionisante accessoire constituée par une ampoule à rayons X. Les rayons pénètrent à l'intérieur de l'appareil à travers une fenêtre de quartz de 4,5 mm d'épaisseur placée en regard des électrodes. Pour se protéger contre les effets des rayons X nous avons entouré l'appareil à décharge et l'ampoule d'une forte plaque de plomb. On sait que si l'on utilise des rayons suffisamment pénétrants, l'ionisation du gaz est proportionnelle à la pression. Il faut donc faire attention de ne pas avoir une action ionisante trop forte, qui abaisserait notablement le potentiel disruptif. Pour les pressions de 10 atmosphères environ, nous avons même noté un abaissement du potentiel explosif allant jusqu'à 8 % en utilisant des rayons X présentant une dureté égale à 5° Benoît. Nous avons observé que les potentiels disruptifs obtenus en utilisant comme source ionisante soit une petite ampoule à rayons X donnant des rayons de dureté égale à 3° Benoît, soit une cellule de radium placée extérieurement contre la fenêtre en quartz sont les mêmes dans les limites de nos expériences. En outre, nous avons fait des essais comparatifs aux pressions peu élevées en utilisant une lampe à mercure. Ces diverses méthodes d'ionisation donnent sensiblement le même résultat pour le potentiel disruptif. Ce résultat est également donné par une série d'étincelles qui se

¹ WARBURG. *Annalen der Physik*, t. 5, 1901.

succèdent, séparées les unes des autres par de courts intervalles de temps, les causes ionisantes extérieures étant supprimées.

Nous avons modifié l'intensité et la distance de cette faible ampoule à rayons X, l'effet est resté le même. Nous pouvons donc admettre en utilisant cette ampoule, que nous évitons le retard disruptif sans produire un abaissement important du potentiel explosif.

L'étude du potentiel explosif est impossible sans ionisation artificielle ; en effet dans ces conditions, la première étincelle passe souvent pour des tensions qui dépassent de 10 à 25 % la tension normale, et le phénomène ne présente pas de régularité. Une source ionisante au contraire régularise le potentiel disruptif qui est le même pour la première étincelle et pour les suivantes. Le courant alternatif, un interrupteur Wehnelt, une bobine d'induction et deux résistances ont été employés pour actionner les tubes à rayons X.

Ordre des expériences.

D'abord, nous avons fait les expériences à la pression de 760 mm de Hg avec 13 paires d'électrodes différentes. Les expériences à 4 atmosphères ont été réalisées avec 9 paires, à 10 atmosphères avec 8 paires d'électrodes. Les résultats obtenus nous ont engagés à poursuivre les expériences en utilisant les trois paires d'électrodes les plus caractéristiques suivantes :

1. Petites électrodes hémisphériques de 15 mm de diamètre de courbure.
2. Petites électrodes planes de 10 mm de diamètre.
3. Grandes électrodes planes à bords incurvés, diamètre total 45 mm, diamètre de la partie plane 30 mm.

Avec ces électrodes, nous avons fait des mesures à 7 atmosphères et depuis 10 atm. de 5 en 5 atmosphères jusqu'à 50 atm.

V. — EXPÉRIENCES JUSQU'À 10 ATMOSPHÈRES.

Pour les expériences à la pression de 760 mm de mercure, nous avons observé avec un soin tout particulier les précautions

relatives au remplissage de l'appareil, car il est évident qu'un résidu d'air contenu dans l'appareil modifie d'autant plus la composition du gaz provenant de la bonbonne que la pression est plus faible.

TABLE 2.

Pression 760 mm de Hg (1 atm.) Potentiels explosifs en volts
 d = distance explosive en mm.

Electrodes N°	$d = 5,00$	$d = 4,00$	$d = 3,00$	$d = 2,00$	$d = 1,00$	$d = 0,50$
Electrodes planes I	17300	14250	11100	7950	4000	1500
» » II	17350	14250	11150	7950	4000	1500
» » III	17400	14300	11150	8000	4100	1700
» » IV	17550	14380	11200	8100	4300	1900
$\Phi = 300$ Calottes sphériques V	17400	14300	11250	8100	4100	1800
» $\Phi = 240$ VI	$d=4,90^{mm}$ 16700	14400	11300	8200	4200	1900
» $\Phi = 180$ VII	$d=4,60^{mm}$ 15950	14420	11400	8250	4350	2050
» $\Phi = 120$ VIII	—	14400	11450	8300	4450	2300
» $\Phi = 60$ IX	—	14300	11350	8300	4550	2400
» $\Phi = 30$ X	—	14550	11500	8400	4900	2500
» $\Phi = 20$ XI	17650	14700	11650	8500	5200	2700
» $\Phi = 15$ XII	17750	14800	11750	8550	5250	2750
Pointes XIII	—	4020	3500	2800	2050	—

La pression est réglée à la valeur de 760 mm de Hg en se servant d'un manomètre à air libre. D'une façon générale, la pression exprimée en mm de Hg s'obtient en ajoutant à la pression atmosphérique la différence de niveau, exprimée en mm

du mercure dans les deux branches du manomètre. Cet appareil permet de mesurer les pressions jusqu'à 4 atm. A 10 atmosphères, nous avons mesuré la pression au moyen des manomètres métalliques fixés directement à l'appareil de décharge et qui sont contrôlés par des manomètres à azote. Nous donnons ici les résultats des expériences jusqu'à 10 atmosphères.

TABLE 3.

Pression $p = 3,040$ m de Hg (4 atm).

Potentiels explosifs en volts. $d =$ distance explosive en mm.

Electrodes N°	$d = 4,50$	$d = 4,00$	$d = 3,00$	$d = 2,00$	$d = 1,00$	$d = 5,00$
Electrodes planes I	50350	45600	35600	25050	14000	8100
» » II	50400	45600	35600	25050	14050	8250
» » IV	50400	45650	35600	25100	14300	8750
Calottes sphériques $\Phi = 240$ VI	—	46650	35900	25450	14150	8200
» $\Phi = 120$ VIII	—	46500	36000	25600	14300	8300
» $\Phi = 60$ IX	—	46200	36300	25700	14400	8350
» $\Phi = 30$ X	—	47200	36750	26250	14900	8800
» $\Phi = 20$ XI	52000	48050	37250	26900	15300	8900
» $\Phi = 15$ XII	52200	48400	37350	27000	15400	9000

Ces résultats sont résumés par les courbes fig. 3 et fig. 4. Les courbes de la fig. 3 représentent la variation du potentiel explosif V en volts en fonction de la distance explosive d en mm pour les différentes électrodes à la pression de 760 mm de Hg. Les courbes de la fig. 4 représentent cette même variation pour la pression de 10 atmosphères.

TABLE 4.

Pression $p = 7,60$ m de Hg (10 atm).Potentiels explosifs en volts, $d =$ distance explosive en mm.

Electrodes N°	$d = 2,50$ $p.d = 25$	$d = 2,00$ $p.d = 20$	$d = 1,50$ $p.d = 15$	$d = 1,00$ $p.d = 10$	$d = 0,50$ $p.d = 5$
Electrodes planes I	70000	57600	43800	30700	15700
» » IV	69200	57300	44000	31000	16000
Calottes sphériques $\Phi = 240$ VI	70900	57700	44500	31100	16000
» $\Phi = 120$ VIII	70500	57300	44250	31500	15900
» $\Phi = 60$ IX	70100	56000	44400	31300	16500
» $\Phi = 30$ X	69800	56800	44500	31400	16800
» $\Phi = 20$ XI	68500	56100	44800	32000	17150
» $\Phi = 15$ XII	68700	56600	44800	31500	17500

L'interprétation des courbes nous donne les résultats suivants:

1° Pression 1 atm. (fig. 3) et 4 atm¹.

Pour une même distance explosive comprise entre 0,5 et 5,0 mm et aux pressions considérées de 1 et 4 atmosphères, le potentiel explosif diminue graduellement et tend vers une limite à mesure que le diamètre de courbure augmente. Le maximum des courbes paraît devoir être atteint pour des diamètres de courbure inférieurs ou égaux à 15 mm, qui est le plus petit diamètre que nous ayons utilisé. Remarquons encore que pour une même pression et pour des distances explosives identiques

¹ Les courbes relatives à la pression de 4 atm. n'ont pas été reproduites, les conclusions sont les mêmes que pour une atmosphère.

les électrodes planes de petit diamètre fournissent des potentiels explosifs un peu plus élevés que celles de grand diamètre, en outre les valeurs obtenues avec des électrodes planes de petit

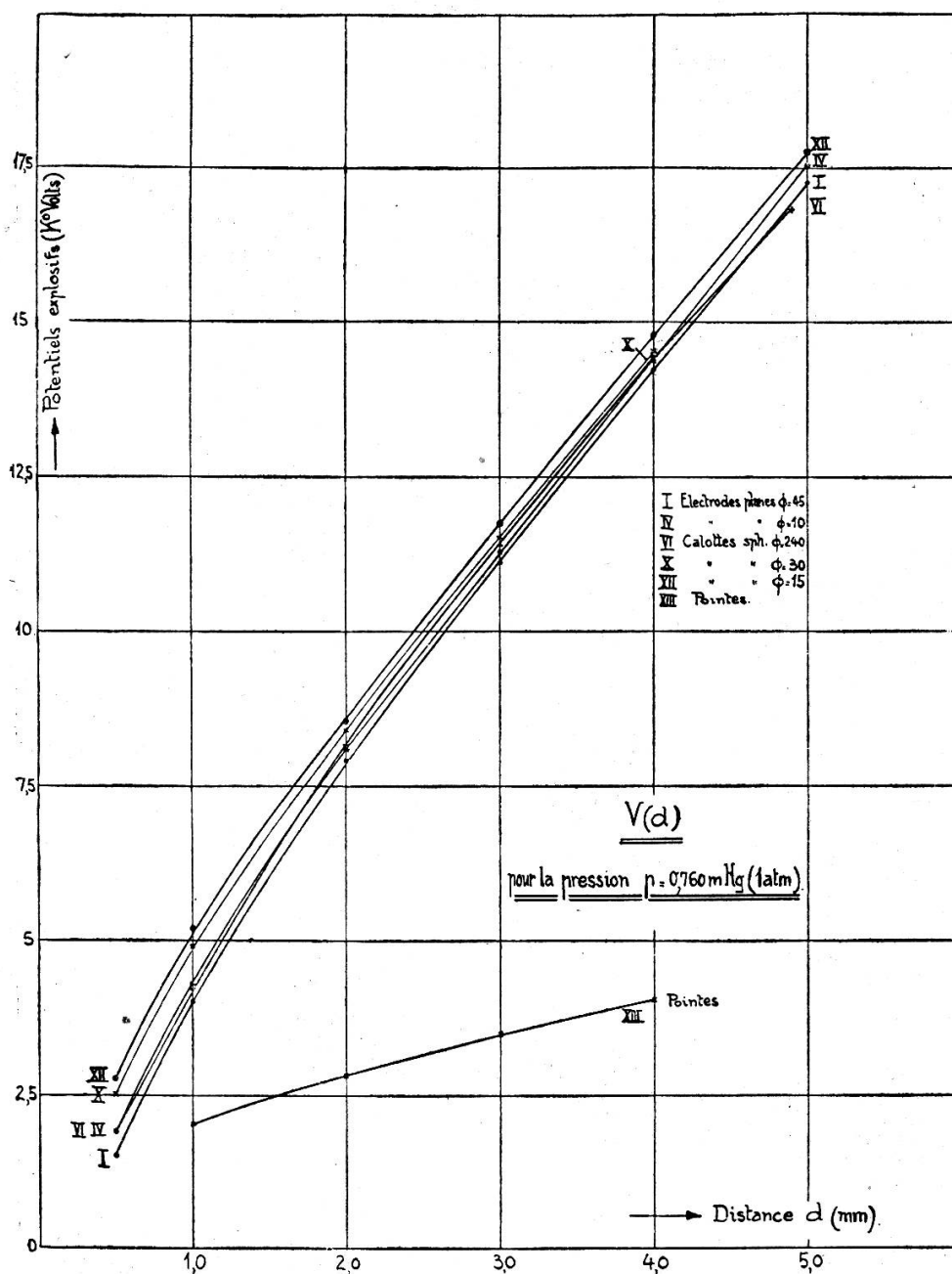


Fig. 3. — $V(d)$ $p = 760$ mm Hg (1 atm).

diamètre sont inférieures à celles que donnent des électrodes hémisphériques de même diamètre.

Les potentiels explosifs pour les pointes en acier sont toujours

très faibles en comparaison des autres électrodes : pour une distance de 1 mm entre pointes, le potentiel disruptif est un peu plus grand que la moitié et pour une distance de 3 mm, infé-

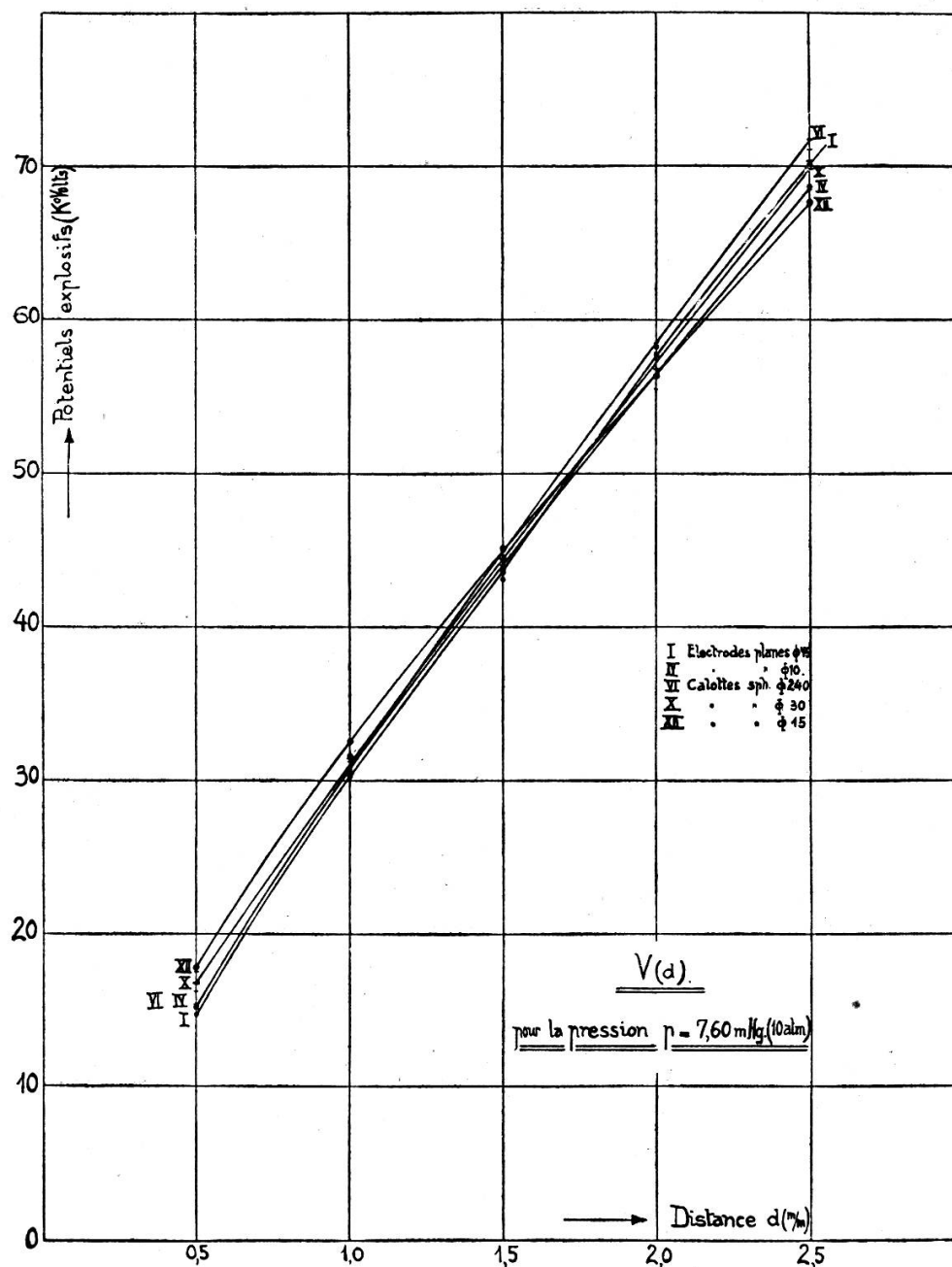


Fig. 4. — $V(d)$ $p = 7,60 \text{ m Hg (10 atm)}$.

rieur au tiers des potentiels explosifs correspondant aux autres électrodes considérées.

Pour les pressions de 1 et 4 atmosphères, le caractère des

courbes pour les distances considérées reste le même. A 10 atmosphères, l'allure des courbes change surtout pour les grandes distances et nous permet de formuler les conclusions suivantes :

2. *Pression 10 atmosphères (fig. 4).*

A distance explosive égale et pour les grandes distances, les grandes électrodes planes et les calottes sphériques de grand rayon donnent des potentiels disruptifs plus grands que les petites électrodes planes et hémisphériques, tandis que pour les petites distances explosives, les électrodes sphériques de petit diamètre présentent des potentiels explosifs plus élevés que les électrodes planes.

Etant donné ces résultats, nous avons pour l'étude des pressions plus élevées choisi les électrodes qui nous ont donné les valeurs extrêmes. Ce sont les grandes électrodes planes, les plus petites électrodes planes et les petites électrodes hémisphériques.

Les résultats jusqu'à 10 atmosphères montrent que la loi de Paschen est vérifiée pour toutes les électrodes et pour les distances supérieures à 1 mm ; les calottes sphériques spécialement donnent des écarts inférieurs à 1 %. Par exemple nous avons pour les calottes sphériques de 60 mm de diamètre : à 1 atm. et la distance $d = 4,0$ mm : $V = 14300$ volts et à 4 atm. et la distance $d = 1,0$ mm : $V = 14400$ volts.

Pour les électrodes planes, la loi de Paschen n'est pas aussi bien vérifiée que pour les calottes sphériques. Nous verrons plus loin comment ces résultats s'expliquent en tenant compte de l'inégale répartition des ions entre les électrodes pendant la période qui précède l'éclatement de l'étincelle.

Mode opératoire. — Voici comment nous procédions pour les mesures : nous avons fait passer d'abord six étincelles séparées par un intervalle d'une demi minute environ en faisant croître très lentement le potentiel. Au moment où se produit l'étincelle, l'aiguille de l'électromètre tombe brusquement et c'est la division maximum atteinte qui donne le potentiel disruptif. Après avoir changé le gaz nous avons établi la même pression et nous avons refait six mesures. Les résultats obtenus de cette manière concordent très bien, comme l'exemple suivant le montre.

TABLE 5.

Electrodes planes de 10 mm de diamètre.
 $d = 3,00$ mm , $p = 4,0$ atm , $t = 20^{\circ}$ C.

Etincelle N°	Première série		Seconde série	
	Divisions	Volts	Divisions	Volts
1	39,3	35600	39,3	35600
2	39,4	35650	39,4	35650
3	39,3	35600	39,4	35650
4	39,0	35450	39,2	35550
5	39,2	35550	39,4	35650
6	39,4	35650	39,2	35550

Moyenne **35600** volts.

Pour les petites distances, les divergences sont encore plus petites ; elles sont un peu plus grandes pour les plus grandes distances. Les résultats concordent bien, les différences maxima des mesures entre elles sont toujours inférieures à 1 %. Grâce à la précision et à la régularité des mesures nous avons pu noter les différences parfois très petites du potentiel explosif correspondant à l'emploi d'électrodes de forme et de grandeur différentes pour une même distance explosive.

(A suivre).