

RUPTURE DIELECTRIQUE DES GAZ DANS DES CHAMPS ELECTRIQUES UNIFORMES

Courbes de Paschen pour l'azote, l'air, l'hexafluorure de soufre, l'hydrogène, le dioxyde de carbone et de l'hélium

BREAKDOWN OF GASES IN UNIFORM FIELDS

Paschen curves for nitrogen, sulfur hexafluoride, hydrogen, carbon dioxide and helium

**Groupe de Travail 03
du Comité d'Etudes 15 (Matériaux isolants)**

***Working Group 03
of study Committee 15 (Insulating Materials)***

1977



RUPTURE DIÉLECTRIQUE DES GAZ
DANS DES CHAMPS ÉLECTRIQUES
UNIFORMES
COURBES DE PASCHEN POUR L'AZOTE,
L'AIR, L'HEXAFLUORURE DE SOUFRE,
L'HYDROGÈNE, LE DIOXYDE DE CARBONE
ET L'HÉLIUM

par

le Groupe de Travail 15.03 composé de

T.W. DAKIN, J. GERHOLD, Z. KRASUCKI,
G. LUXA (*Chef de file*), G. OPPERMANN, J. VIGREUX,
G. WIND, et H. WINKELNKEMPER

A. — GÉNÉRALITÉS

A partir de 1970, le Groupe de Travail 15.03 (Isolants gazeux) du Comité d'Étude 15 (Matériaux isolants) de la CIGRE a entrepris auprès des pays membres de la CIGRE, une enquête sur la tension disruptive U_d des gaz usuels présentant un intérêt technique pour l'industrie électrique. Cette enquête avait pour but de réunir les données publiées ou non, et de les traduire sous la forme commodément exploitable de courbes récapitulatives synthétiques et de tableaux numériques. Ces données qui concernent six gaz parmi les plus courants, ont été traitées dans deux articles parus dans la revue *Electra*, respectivement en janvier 1974 et en mai 1977, le premier relatif à l'air, à l'azote et à l'hexafluorure de soufre, le second à l'hydrogène, au dioxyde de carbone et à l'hélium. Pouvant servir de références, il a été décidé de leur assurer une plus grande diffusion dans les pays membres de la CIGRE en les rassemblant dans une seule publication.

Ces données sont présentées sous la forme de courbes de variation de la tension disruptive en fonction du produit de la pression par la distance, dans le cas d'un champ électrique uniforme (courbes de Paschen [A1]). Il fut décidé de faire figurer sur chaque graphique, les points expérimentaux des différentes références prises en considération, de manière à indiquer l'importance des écarts. L'unité de pression choisie est le bar, et celle de distance le millimètre. La tension disruptive est donnée en fonction du produit bar.mm, à la température de 20 ou 25 °C. Ceci permet de présenter sur une même courbe les résultats obtenus dans différentes gammes de pressions et de distances. Il a été décidé, ensuite, d'utiliser des échelles logarithmiques, de manière à montrer l'ensemble de la courbe de Paschen, de représenter celle-ci

BREAKDOWN OF GASES
IN UNIFORM FIELDS
PASCHEN CURVES FOR NITROGEN,
AIR, SULFUR HEXAFLUORIDE,
HYDROGEN, CARBON DIOXIDE
AND HELIUM

by

Working Group 15.03 composed of

T.W. DAKIN, J. GERHOLD, Z. KRASUCKI,
G. LUXA (*Convener*), G. OPPERMANN, J. VIGREUX,
G. WIND and H. WINKELNKEMPER

A. — GENERAL

*The Working Group 15.03 (Insulating Gases) of CIGRE Study Committee 15 (Insulating Materials), undertook, starting in 1970, to assemble available published and unpublished data from CIGRE members countries on the breakdown voltage, U_d , of common gases of technical importance to the electrical industry and to prepare composite summary curves and tables for convenient reference purposes. These data, relevant to six most common gases, were considered in two papers published in *Electra*, respectively No. 32, January 1974 and No. 52, May 1977. The first paper presents data for air, nitrogen and sulfur hexafluoride, the second for hydrogen, carbon dioxide and helium. It was decided to ensure them a wider distribution in the CIGRE members countries with publishing them in a separate booklet, as a reference source.*

These data are presented in the form of curves of breakdown voltage versus the pressure-spacing product for essentially uniform electric fields [A1]. It was decided that graphs would be prepared which would show breakdown voltage points from the various references considered in preparing the curves, to indicate the amount of variation. Bar was selected as the unit of pressure and millimetre as the spacing unit. The breakdown voltage was graphed as a function of the bar.mm-product for 20 or 25 °C. This permitted graphing on a common curve data from references using different spacing and pressure ranges. It was further decided that a log-log graph scale would be used, to present the whole Paschen curve, and to present the higher voltage range on a linear scale, together with tabulated values of the composite curve which best

par un tracé en coordonnées linéaires dans le domaine des tensions élevées, et de dresser un tableau de valeurs numériques correspondant à la courbe moyenne entre diverses données expérimentales. Pour le tracé de cette courbe, les données n'ont pas été considérées uniquement d'un point de vue statistique (moindres carrés), mais également d'un point de vue critique, dans la mesure où certains résultats semblaient moins corrects que d'autres. Au vu de la courbe, le lecteur peut se rendre compte dans quelle mesure les valeurs expérimentales des différents auteurs s'écartent de la courbe principale.

En vertu de la loi de Paschen, la tension disruptive U_d , d'un gaz dans un champ électrique uniforme est une fonction simple du produit pd de la pression p par la distance d . Il convient de préciser que cette loi est valable pour une température constante; pour d'autres températures, les valeurs données doivent être corrigées. Une formulation plus générale de la loi de Paschen stipule que la tension disruptive est une fonction simple du produit μd , de la masse volumique du gaz, μ par la distance d . Seules des variations extrêmes de température peuvent modifier la tension disruptive, si la masse volumique ne varie pas. A pression constante, et pour des variations de températures modérées, la tension disruptive varie conformément à la loi des gaz parfaits. Pour les courbes figurant dans cet article, et qui correspondent à des températures de 20 ou 25°C (293 ou 298 K), les corrections de pression sont faibles et, en première approximation, inversement proportionnelles à la température absolue. Pour des variations importantes de température, les corrections doivent faire appel aux tables des masses volumiques des gaz considérés, ou des équations plus rigoureuses comme celles de Van Der Waals.

Dans son domaine de validité, la loi de Paschen exprime qu'à chaque valeur de la tension disruptive correspond un facteur critique de multiplication des électrons par chocs ionisants entre électrons et molécules du gaz. Le nombre critique de collisions est obtenu quand le champ électrique s'étend à un nombre critique de molécules, indépendamment de leur proximité (de leur masse volumique). Il en résulte que le fait de diminuer la masse volumique demande une augmentation proportionnelle de la distance, et réciproquement.

Si la loi de Paschen semble bien être une caractéristique de chaque gaz, on observe pourtant des déviations, surtout pour les pressions élevées ou les très faibles distances. L'analyse de ces déviations montre qu'aux hautes pressions aussi bien qu'aux petites distances, elles sont très probablement associées à la présence de champs électriques élevés, habituellement supérieurs à 10 kV/mm [A 2] [A 3]. Le seuil à partir duquel on observe ces déviations, qui conduisent à des tensions disruptives plus faibles que celles indiquées sur la courbe de Paschen, est variable et dépend de la surface des électrodes et de la présence de fines particules de matière dans le gaz. Des facteurs tels que la rugosité des surfaces, la présence de pellicules d'oxyde et celle de particules étrangères, conductrices ou semi-conductrices, qui peuvent se trouver en suspension dans le gaz et atteindre les électrodes produisent

filled the data. Some personal judgements were used in drawing the composite curves rather than making them a statistical (least square) fit to all the data points since some values appeared less accurate than others. The extent to which data points from various references departed from the composite curve can be seen by the reader, by inspecting the graphs.

Paschen's Law states that the breakdown voltage, U_d , of a gas in a uniform electric field is a simple function of the product, pd , of the pressure, p , and the spacing, d . It must be understood that this applies at a constant temperature; at other temperatures the given values must be corrected. A more general statement of Paschen's Law is that the breakdown voltage is a simple function of the product μd of the gas density, μ and the spacing, d . Only extreme temperature variations will cause a change in breakdown voltage, if the gas density remains the same. At constant pressure and for modest temperature variations the breakdown voltage will vary according to the perfect gas laws. Modest temperature corrections for the pressure values in the curves in this paper, which are for the temperature of 20 or 25 °C (293 or 298 K), can be estimated as being proportional to the absolute temperature. For large temperature variations, the corrections should be made using tables of the relative gas density for the respective gases or more exact equations such as the Van Der Waals equation.

Within the range of its applicability, the Paschen "law" implies that each breakdown voltage requires a critical number of electron multiplications by ionizing electron collisions with the gas molecules. The critical number of collisions is achieved when the electric field intersects a critical number of molecules, independently of their proximity (density). Thus, decreased density requires proportionately greater spacing and vice versa.

Departures from the Paschen Law relation, which seems to be a unique one for each gas, are observed notably for quite high pressures, or very small spacings. Analysis of the deviations at high pressures, as well as at very small spacings, indicates that the deviation is associated with high electric fields, usually greater than 10 kV/mm [A 2], [A 3]. The threshold for these deviations, which give breakdown voltages departing below the Paschen curve, is variable, depending on the electrode surface condition and fine particle matter in the gas. Surface roughness, oxide films, and floating conducting or semiconducting particles which reach the electrode surfaces, all have the effect of locally increasing the electric stress at the surface. The surface roughness and the particles increase the stress by providing points of high stress and the oxide films provide local barriers for ionic charge

tous un renforcement local de la contrainte électrique à la surface. Les irrégularités des surfaces et les particules qui y sont déposées, augmentent la contrainte en produisant essentiellement des pointes microscopiques; quant aux pellicules d'oxyde, elles constituent localement des barrières qui retiennent les ions au voisinage immédiat des surfaces métalliques où ils produisent un renforcement du champ électrique. Cet effet de concentration des contraintes peut se traduire, lorsque le champ électrique atteint une intensité suffisante, par l'émission d'électrons à partir du métal et par l'apparition de micro décharges dans le gaz. Ces électrons supplémentaires s'ajoutent à ceux produits par chocs ionisants et d'autres mécanismes d'ionisation secondaires, et peuvent réduire le niveau de tension nécessaire pour produire l'amorçage.

Les dispersions statistiques de la tension disruptive dans le gaz et sa décroissance en fonction de la surface des électrodes, que l'on observe pour les valeurs élevées de la pression et du champ électrique, sont reliées à la présence de ces concentrations locales.

Etant donné que la réduction de la tension disruptive est liée essentiellement à l'intensité maximale atteinte localement par le champ électrique du fait des plus importantes irrégularités de surface, ou particules, etc., la tension disruptive peut être soumise dans le domaine des hautes pressions (où les valeurs dévient de la courbe de Paschen), à la statistique des valeurs minimales. Cette étude statistique conduit à une relation entre la tension disruptive et la surface des électrodes, relation qui fut formulée initialement par Weber et Endicott [A 4] pour des ruptures diélectriques dans l'huile. Il n'est justifié de se raccorder à une telle analyse statistique que si les conditions expérimentales restent stables tout au long des essais. Malheureusement, des conditions stables ne peuvent exister à la surface des conducteurs ou risquent de n'être atteintes, de manière approchée, qu'après un certain nombre d'essais. Ce phénomène de formation des électrodes (sous l'effet des décharges) se traduit par une augmentation lente de la tension d'amorçage jusqu'à un niveau constant, au fur et à mesure que l'on soumet le système à des décharges de basse énergie.

Si les irrégularités superficielles et l'importance des corps étrangers étaient réduites, ces écarts, par rapport à la loi de Paschen, devraient évidemment se produire pour des champs électriques plus élevés [A 5].

Des écarts par rapport à la courbe de Paschen se produisent aussi à pression moyenne pour de très faibles distances, lorsque le champ électrique disruptif atteint des valeurs élevées, dépassant 10 kV/mm, et lorsque les dimensions des irrégularités superficielles deviennent significatives devant les distances entre électrodes. Ces phénomènes disruptifs mettant en jeu des pressions modérées et des distances faibles, ont été étudiés par Germer [A 6], pour les valeurs de p.d. inférieures à $3,7 \cdot 10^{-3}$ bar.mm, c'est-à-dire se situant à gauche du minimum de la courbe de Paschen.

to lie close to the metal surface, thus creating a local electric field enhancement. The effect of these electric stress concentrations may produce, at higher applied electric fields, emission of electrons from the metal, or micro gas discharges. These extra electrons add to those formed by ionizing collisions and other normal secondary ionization processes, and may reduce the corresponding voltage required for breakdown.

Correlated with these local surface stress concentrations are statistical variability of the gas breakdown voltage, and decreasing breakdown voltage with increasing area of the electrodes, both of which occur predominantly at high gas pressures and electric fields.

Since the breakdown voltage will be reduced most by the largest surface point or particle, etc., the breakdown voltage may be governed in the higher pressure region (where the values depart below the Paschen curve) by the minimum value statistics. These statistics lead to an area dependence which was initially developed for oil breakdown by Weber and Endicott [A 4]. Consistent adherence to these statistics depends on having stable conditions throughout the tests. Unfortunately, stable surface conditions may not exist, or may only be apparently reached after some time of testing. This "conditioning" (spark-conditioning) effect is made apparent by a steady rise in breakdown voltage to a plateau level as the system is broken down by successive low energy sparks.

If the level of surface imperfections and particles is reduced it should be obvious that departures from Paschen's Law will occur at higher electric fields [A 5].

Departures from Paschen's curve at moderate pressures occur at very small spacings, where the breakdown electric field is also high, increasing above 10 kV/mm, and where surface roughness becomes of significant dimension compared to the mean spacing. Breakdown at moderate pressures and small spacings for p.d.-values below 3.7×10^{-3} bar.mm, to the left of the Paschen minimum have been studied by Germer [A 6].

Des mesures de tensions disruptives ont été effectuées pour les faibles valeurs de pd dans la région du minimum de la courbe de Paschen. Ces mesures mettaient en jeu de faibles pressions plutôt que de faibles distances. Pour les faibles pressions, dans la région du minimum des tensions disruptives, l'amorçage se produit souvent sous la forme d'une large décharge lumineuse, et non le long d'un étroit canal d'arc. Les critères d'amorçage deviennent alors quelque peu arbitraires.

Les références [A 2], [A 3], [A 7], [A 8], [A 9] et [A 10] peuvent être consultées pour une analyse plus détaillée des phénomènes disruptifs dans les gaz.

Measurements of breakdown voltages at small p.d.-values in the vicinity of the Paschen minimum have been done more often using low pressures rather than small spacings. At low pressures in the minimum voltage breakdown region, breakdown often occurs as a broad glow discharge rather than a narrow spark channel. Breakdown criteria have been somewhat arbitrary.

References [A 2], [A 3], [A 7], [A 8], [A 9] and [A 10] can be consulted for more details and discussion of gas breakdown phenomena.

Références générales — General references

- [A1] F. PASCHEN. — *Annalen der Physik*, 37, p. 69-96 (1889).
- [A2] J.M. MEEK and J.D. CRAGGS, *Electrical Breakdown of Gases*, Oxford Press, 1953.
- [A3] T.W. DAKIN and D. BERG. — *Theory of Gas Breakdown*, Chapter in *Progress in Dielectrics*, Vol. 4, Heywood & Company, Ltd., London or Academic Press, New-York (1962).
- [A4] K.H. WEBER and H.S. ENDICOTT. — *Trans. AIEE*, 76-III, p. 1091-1097 (1957).
- [A5] A.H. COOKSON. — *Proc. IEE*, 117, p. 269 (January 1970).
- [A6] L.H. GERMER. — *J. App. Physics*, 30, p. 46 (1959).
- [A7] *Encyclopedia of Physics XII, Gas Discharges*, Vol. XXII, Springer, Berlin, 1956.
- [A8] LLEWELLYN F. JONES. — *Electrical Breakdown of Gases*, Oxford Press, London, 1953.
- [A9] B. GÄNGER. — *Der Elektrisch Durchschlag von Gasen*, Springer, Berlin, 1953.
- [A10] M. LAPORTE. — *Décharge électrique dans les gaz*, Colin, Paris.

B. — COURBE DE PASCHEN DE L'AZOTE

par T.W. DAKIN

L'azote est le plus abondant parmi les gaz présents dans l'atmosphère; il représente environ 80 % de l'atmosphère terrestre. La mesure de sa rigidité diélectrique remonte aux travaux des premiers expérimentateurs, comme indiqué dans les ouvrages classiques de Thompson et Thompson [B 10] et de Townsend [B 11].

Pour les tensions les plus élevées du domaine de validité de la loi de Paschen, la plupart des résultats expérimentaux concordent de manière assez satisfaisante (fig. B 1 et B 2). La zone où l'on peut noter le plus de divergences entre les résultats obtenus par les différents auteurs est celle du minimum de la courbe de Paschen, où les questions de pureté du gaz et des électrodes prennent une importance notable. Les valeurs annoncées au cours des dix dernières années pour le point bas de la courbe de Paschen, varient entre un minimum de 225 V et un maximum de 350 V, pour des électrodes en matériaux différents : cuivre et acier, respectivement.

Pour des champs électriques plus élevés pour lesquels les tensions disruptives cessent manifestement d'obéir à la loi de Paschen dont elles s'écartent par défaut, la figure B 2 ne présente que

B. — PASCHEN CURVE FOR NITROGEN

by T.W. DAKIN

Nitrogen is the most abundant permanent gas in the atmosphere, comprising about 80 % of the earth's atmosphere. Its dielectric strength has been measured by some of the earliest investigators, as reported in the classic volumes of Thompson and Thompson [B 10] and Townsend [B 11].

The agreement of most of the data at higher voltages within the range of applicability of Paschen's Law is fairly good (Fig. B 1 and B 2). Most of the disagreement between the data of different investigators is in the range of the Paschen minimum, where purity of gas and electrodes is quite important. The minimum values reported within the past decade range from a minimum of 255 V to a maximum of 350 V with different electrode metals : copper and steel, respectively.

Data at higher electric fields where the breakdown voltages obviously departed to values below the Paschen curve are in Figure B 2 for only two of the references, since the spacing and voltage

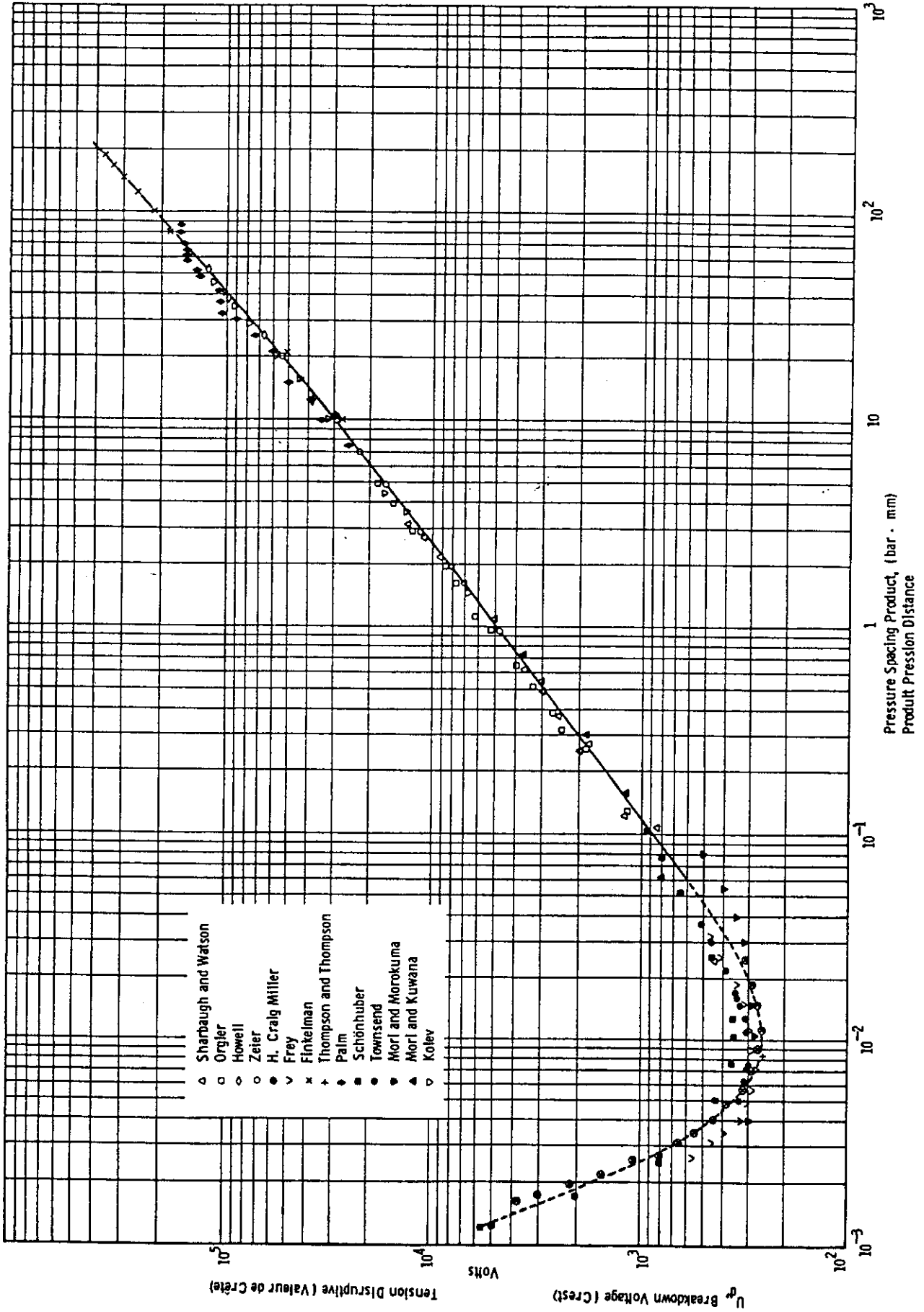


Figure B1

Courbe de Paschen pour l'azote en échelles logarithmiques. Température 25 °C.
 Paschen Curve for Nitrogen in log-log scale. Temperature 25 °C.

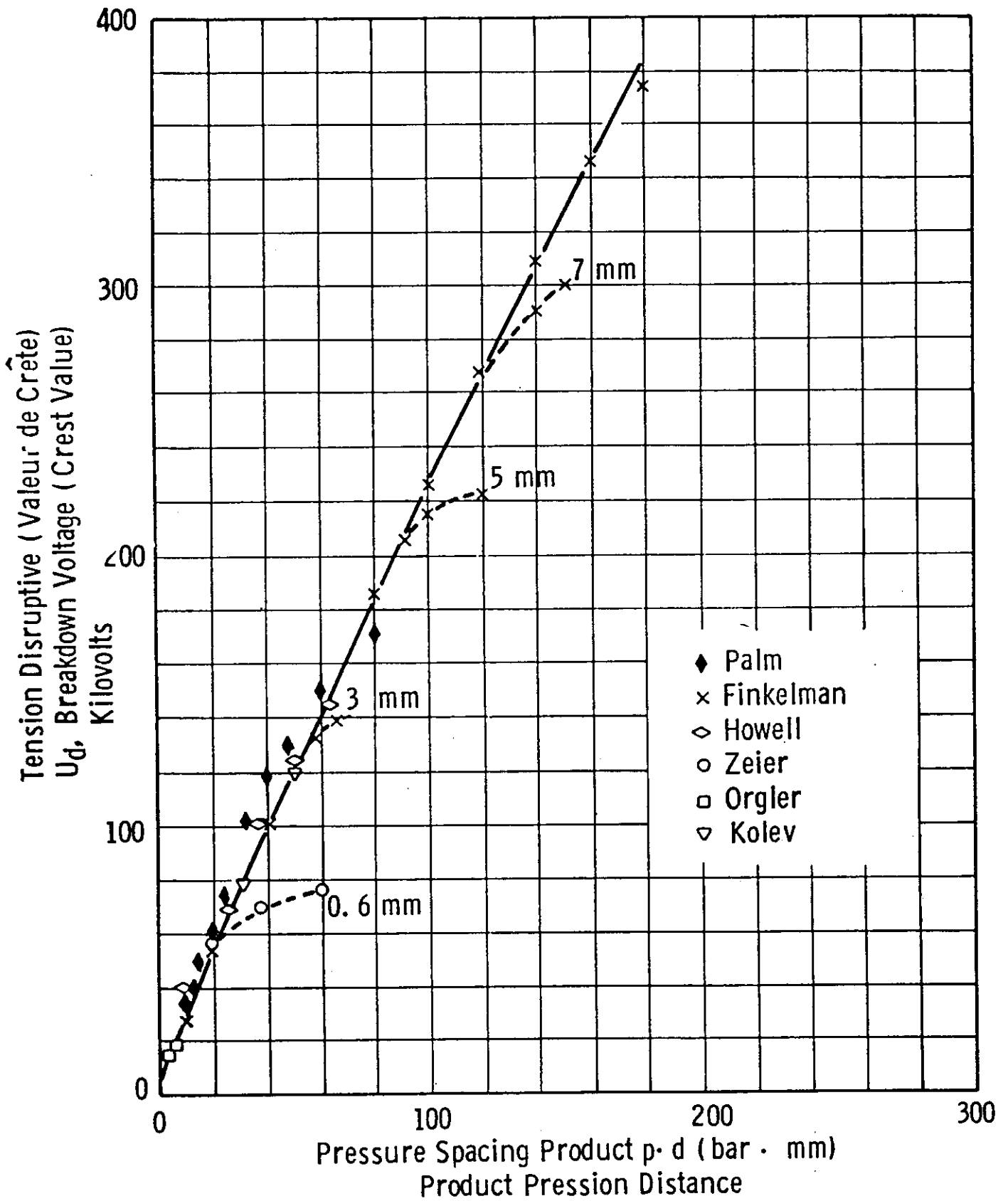


FIGURE B2
 Courbe de Paschen pour l'azote en échelles linéaires. Température 25 °C.
 Paschen Diagram for Nitrogen in linear scale. Temperature 25 °C.

les résultats de deux auteurs, étant donné que les distances et les tensions à partir desquelles on observe cette déviation varient d'un expérimentateur à l'autre, sans doute à cause de différences dans l'état de surface des électrodes. Les déviations par rapport à la courbe de Paschen sont représentées sur la figure B 2 par les courbes en pointillé qui se détachent de la courbe principale vers la droite et dont chacune correspond à une distance donnée entre les électrodes.

Plus de détails sur les essais effectués par les auteurs, ne figurant pas sur le tableau B 1, peuvent, bien entendu, être obtenus en consultant les références originales.

Notes sur les références concernant la courbe de Paschen de l'azote.

[B 1] ZEIER

Observation de déviations par rapport à la loi de Paschen pour des contraintes dépassant environ 10 kV/mm.

[B 2] FINKELMANN

Ces courbes font apparaître un écart par rapport à la courbe de Paschen à partir d'une contrainte de l'ordre de 40 kV/mm.

[B 3] PALM

Aucune influence de la fréquence de la tension appliquée n'a pu être mise en évidence entre 50 et 100 Hz.

[B 4] SHARBAUGH et WATSON

Des écarts importants par rapport à la courbe de Paschen, ont été observés aux pressions élevées, pour des champs électriques dépassant 20 kV/mm. Retard statistique important à une pression de 1 bar en l'absence d'irradiation, mais nul à 50 bar.

[B 5] SCHÖNHUBER

Essais dans la gamme des pd inférieurs mais proches de celui du minimum de Paschen. L'auteur traite de la façon de disposer les électrodes de manière à éviter les amorçages sur des distances plus grandes que prévues aux pressions inférieures au minimum de Paschen. Il utilise un tube de verre de 51-52 mm de diamètre et des électrodes de 50 mm, dont les bords présentent un arrondi de 1 mm, distantes de 10 ou 20 mm, et fait varier les pressions. Les électrodes sont prises dans de la tôle d'acier et soumises à un polissage poussé, à un lavage et à un dégazage sous vide à 900 °C pendant 10 heures. La pureté de l'azote était de 99,9 %, la principale impureté étant l'argon dont la concentration ne

stress for departure varied somewhat from one investigator to another, presumably due to differences in surface electrode condition. The departures from the Paschen curve are shown in Figure B 2 as dotted lines extending to the right from the Paschen curve at different levels of spacing.

More details of the testing by the respective investigators not shown in Table B1 can be obtained, of course, by consulting the original references.

Notes on References to the Nitrogen Paschen Curve.

[B 1] ZEIER

Departures from the Paschen curve noted at stresses above about 10 kV/mm.

[B 2] FINKELMANN

Curves showed departures from the Paschen curve at a stress of about 40 kV/mm.

[B 3] PALM

No frequency dependence was observed between 50 and 100 Hz voltages.

[B 4] SHARBAUGH and WATSON

Large departures from the Paschen curve were observed at higher pressures, at electric fields above 20 kV/mm. A considerable statistical time lag at 1 bar pressure without irradiation, but at 50 bar there was no statistical time lag.

[B 5] SCHÖNHUBER

Tests near and below the Paschen minimum. Author discusses design of electrode arrangements to avoid larger gap breakdown at pressures below the Paschen minimum. He used a glass tube with a diameter of 51-52 mm and an electrode of 50 mm and an edge radius of 1 mm, at a spacing of 10 mm or 20 mm and varied the pressure. Electrodes were sheet steel, highly polished, washed and vacuum degassed at 900 °C for 10 hrs. The N₂ purity was 99.9 % with the primary impurity argon, not exceeding 0.1 %. Mercury was avoided. The breakdown voltage, (with direct voltage) was defined as the voltage at which the discharge became self sustained within 5 seconds.

TABLEAU B1 - TABLE B1

Conditions d'essais relatives aux références pour l'azote
 Details of breakdown tests of references for nitrogen

Référence n°	[B1]	[B2]	[B3]	[B4]	[B5]	[B6]	[B7]	[B8]	[B9]	[B10]	[B11]	[B12]	[B13]	[B14]	[B15]
Symbole sur graphique Symbol on graph	○	x	◆	△	■	□	○	◇	v	See Voir B6	●	▼	▲		▽
Electrodes	spheres	R	planes	spheres	*	spheres	*		planes **			R	R	B	spheres
nature				acier steel	acier D steel		Cu * D					Ni D	Ni D	Al + acier steel	Cu
fini finish				polies polished	polies polished									polies polished	polies polished
diamètre mm diameter	15 + 300	135	108	25.4	50	12,5	24,6*		21			45	45	15-25	300
coins arrondis edge radius		R	R?		1 mm		*					R	R	B	
Température pendant l'essai °C Temperature of test	20	20		25	20		22,5					20	20		25
Nature de la tension appliquée Applied voltage		50 Hz	50 Hz 100 Hz	continue d.c.	continue d.c.	alternative a.c.	continue d.c.		continue d.c.					continue d.c.	50 Hz
Pressions bar Pressure range	1 - 120	1 - 20	2 - 15	1 - 200	.00006 -.005	.05 - 1	.0005 -.008		.00087 -.0019	.0013 -.0053	.0004 -.008		.001 -.07	5 - 70	1 - 7
Distances mm Spacings	.3 - 1.5	.2 - 2	1 - 16	.00625 -.625	10 - 20	5	3,4		2 - 5		4 - 10	10	10	1 - 3	2,5.10 ⁻¹ -50
Variations de p.d bar. mm Range of p.d	1 - 40	1 - 20	2 - 225	2,5.10 ⁻² - 8	10 ⁻³ - 10 ⁻¹	1,3.10 ⁻¹ - 6	2.10 ⁻³ - 3.10 ⁻²	12 - 50	.25.10 ⁻³ - 5.8.10 ⁻²		4.10 ⁻³ - 3.8.10 ⁻²	4.10 ⁻³ - 8.10 ⁻²	10 ⁻² - 7.10 ⁻¹	5 - 210	1,5 - 51

• Voir notes D : dégazées degassed R : Rogowski B : contour Bruce Bruce contour
 ** avec l'espace entre les électrodes limité par un anneau d'ébonite
 with gap enclosed by ebonite ring

dépassait pas 0,01 %. La présence de mercure est évitée. La tension disruptive (en continu) est définie comme la tension à partir de laquelle la décharge s'entretient pendant 5 s.

[B 7] CRAIG MILLER

Résultats dans la zone de pd située au voisinage et au-dessous du minimum de Paschen. Des précautions sont prises pour éviter la présence de mercure; les électrodes cylindriques en cuivre très pur de 24,6 mm de diamètre, distantes de 3,4 mm, étuvées à 250 °C et nettoyées par décharge lumineuse dans le néon. Les électrodes sont montées dans un tube en pyrex dont le diamètre laisse un jour de 0,1 mm pour éviter les amorçages sur les trajets plus longs, qui se produiraient sans cette précaution dans la gamme des pressions situées au-dessous du minimum de Paschen. L'amorçage est défini comme une décharge entretenue véhiculant un courant de 10^{-7} A.

[B 12] MORI et MOROKUMA

Essais dans la région du minimum de Paschen. Electrodes dégazées par chauffage haute fréquence

[B 7] CRAIG MILLER

Data near and below the Paschen minimum. Precautions taken include a mercury free system, zone refined copper cylinders 24.6 mm diameter electrodes, spaced at 3.4 mm, baked out at 250 °C and cleaned by glow discharge in neon. Electrodes were mounted in a Pyrex tube with 0.1 mm greater diameter to avoid breakdown by a longer path as will occur at pressures below the Paschen minimum if it is not prevented. Breakdown defined as a self sustained discharge, with a current of 10^{-7} A.

[B 12] MORI and MOROKUMA

Tests near Paschen minimum. Electrodes degassed with RF heating at 1.33×10^{-9} bar. Nickel Rogowski

TABLEAU B 2 - TABLE B 2
Tensions disruptives de l'azote dans un champ uniforme
Breakdown voltages of nitrogen in uniform field
Temperature 25 °C. Valeurs relevées sur la courbe de Paschen.
Values of the Paschen curve (fig. B 1)

Produit pression distance <i>Pressure Spacing Product</i> bar.mm	Tension disruptive, valeur de crête <i>Breakdown Voltage, Crest</i> kV	Produit pression distance <i>Pressure Spacing Product</i> bar.mm	Tension disruptive valeur de crête <i>Breakdown Voltage, Crest</i> kV	Produit pression distance <i>Pressure Spacing Product</i> bar.mm	Tension disruptive, valeur de crête <i>Breakdown Voltage, Crest</i> kV
$3 \cdot 10^{-3}$	0.76	0.5	2.9	120	266
$4 \cdot 10^{-3}$	0.48	1.0	4.8	140	306
$5 \cdot 10^{-3}$	0.375	1.5	6.6	160	346
$6 \cdot 10^{-3}$	0.31	2	8.2	180	384
$8 \cdot 10^{-3}$	0.26	3	11.3		
$1 \cdot 10^{-2}$	0.26	4	14.4		
$2 \cdot 10^{-2}$	0.30	5	17.0		
$3 \cdot 10^{-2}$	0.36	6	20.0		
$4 \cdot 10^{-2}$	0.44	8	25.1		
$5 \cdot 10^{-2}$	0.52	10	30.0		
$6 \cdot 10^{-2}$	0.58	15	43.0		
$8 \cdot 10^{-2}$	0.73	20	55.0		
$1 \cdot 10^{-1}$	0.86	30	78.0		
		40	100		
		50	121		
		60	143		
		80	182		
		100	224		

sous $1,32 \times 10^{-9}$ bar. Electrodes de Rogowski en nickel, distantes de 10 mm. Des essais effectués avec des électrodes non dégazées ont aussi permis de mesurer un minimum de Paschen aux environs de 400 V.

[B 13] MORI et KUWANA

Les résultats d'essais portés sur la courbe ont été obtenus avec des électrodes de Rogowski de 60 mm de diamètre, ayant un méplat de 45 mm de diamètre et distantes de 10 mm. Des résultats supplémentaires correspondant à des tensions légèrement supérieures ont été obtenus avec des électrodes non dégazées sauf par pompage. Comme ces résultats tombaient dans les limites de dispersion des autres auteurs, ils n'ont pas été reportés sur la courbe.

[B 14] COHEN

Les résultats de Cohen, mesurés à hautes pressions, de 5 à 70 bar et pour des distances de 1 à 3 mm, avec des électrodes d'acier doux brillant, n'ont pas été portés sur le graphique car ils ne semblent pas en très bon accord avec la courbe de Paschen, probablement en raison des valeurs élevées des champs électriques, toujours supérieures à 10 kV/mm. La tension disruptive (allant jusqu'à 100 kV) augmente de moins d'un facteur 2 lorsque la pression augmente de 10 à 70 bar, et varie moins vite que linéairement, avec la distance, aux plus hautes pressions.

electrodes at 10 mm spacing. Tests were also made with undegassed electrodes which showed the Paschen minimum at about 400 V.

[B 13] MORI and KUWANA

Tests plotted were made with degassed Rogowski electrodes 60 mm diameter with flat part 45 mm diameter at 1 cm spacing. Additional data were taken with undegassed, but evacuated electrodes which were slightly higher. Since they fell within the data spread of other investigators, they were not plotted.

[B 14] COHEN

The N_2 data from a paper by Cohen taken at high pressures of 5 to 70 bar at spacings of 1 to 3 mm with bright mild steel electrodes, were not graphed, since they did not appear to fit the Paschen curve very well, probably because of the high electric fields, all greater than 10 kV/mm. The breakdown voltage (extending to 100 kV) increases less than twice with increasing pressure from 10 to 70 bar, and increases less than linearly with spacing at the higher pressures.

Références pour l'azote — References for nitrogen

- [B1] O. ZEIER. — *Annalen der Physik*, 5-14, (1952), p. 415-47.
- [B2] E. FINKELMANN. — *Archiv für Elektrotechnik*, 31, (1937), p. 282-6.
- [B3] A. PAL. — *Archiv für Elektrotechnik*, 28, (1934), p. 296-302.
- [B4] H. SHARBAUGH and K. WATSON. — Ann. Report 1959, NRC Conference on Electrical Insulation; also *J. Appl. Physics*, 40, (1969), p. 328.
- [B5] M.J. SCHÖNHUBER. — *Trans. IEEE on Power Apparatus and Systems*, 88, (1969), p. 100-107.
- [B6] A. ORGLER. — *Annalen der Physik*, 1, (1900), p. 159.
- [B7] H. CRAIG MILLER. — *J. Appl. Physics*, 34, (1963), p. 3418.
- [B8] A.H. HOWELL. — *AIEE Trans.*, 58, (1939), p. 193-206.
- [B9] B. FREY. — *Annalen der Physik*, 85, (1928), p. 381.
- [B10] J.J. THOMPSON and G.P. THOMPSON. — *Conduction of Electricity through Gases*, Vol. 2, p. 506, Cambridge Univ. Press, (1933).
- [B11] J.S. TOWNSEND. — *Electricity in Gases*, p. 324, Oxford Univ. Press, (1915).
- [B12] T. MORI and Y. MOROKUMA. — Unpublished data transmitted by M. NAKAMUTA, (1970), to Cigré Group 15.03.
- [B13] T. MORI and H. KUWANA. — *Joint Convention Record of Four Institutes of Electrical Engineers, Japan*, 93, (1964), transmitted by M. NAKAMUTA, (1970), to Cigré Group 15.03.
- [B14] E.H. COHEN. — *IEE Proceedings*, A 103, (1956).
- [B15] K.I. KOLEV. — *Tech. Univ. Eindhoven, Communication to Cigré Group 15.03*, 1973.

C. — COURBE DE PASCHEN DE L'AIR

par G. WIND

En matière d'électricité, l'air constitue un milieu isolant naturel et c'est sans doute pour cette raison que la rupture diélectrique de l'air à la pression atmosphérique et à température ambiante a fait l'objet d'investigations très variées.

De nombreuses publications ainsi que des normes nationales ou internationales [C 1 - C 6] reproduisent des tableaux réunissant les valeurs des tensions disruptives de l'air à la pression normale (1,013 bar) et à une température de 20 °C ou 25 °C.

Les tensions disruptives de l'air ont notamment été mesurées entre électrodes sphériques dont on a fait varier l'écartement d , généralement entre 0,5 et 1 500 mm, le diamètre D des sphères étant choisi en fonction de cet écartement de façon à ce que la rupture diélectrique de l'air ait lieu dans un champ électrique quasi uniforme. L'expérience montre qu'à cet égard le champ ne peut plus être considéré comme étant uniforme lorsque d devient supérieur à 0,5 D .

Les valeurs des tensions disruptives sont pratiquement indépendantes de la forme de l'onde de tension, (que la tension appliquée soit continue, alternative ou qu'il s'agisse d'ondes de choc positives ou négatives de 1/50 μ s). Toutefois, les valeurs mesurées avec des ondes de choc positives s'avèrent légèrement plus élevées que dans les autres cas mentionnés, quand l'écartement entre deux sphères d'un diamètre donné augmente, tout en étant encore inférieur à 0,5 D .

Pour le tracé de la courbe de Paschen qui est reproduit en figures C 1 et C 2, respectivement en coordonnées logarithmiques et linéaires, seules ont été prises en compte les valeurs des tensions disruptives déterminées dans les conditions assurant la meilleure uniformité du champ.

Néanmoins, et à titre de confirmation du caractère général de la loi de Paschen, il a paru intéressant de porter en figure C 1 les valeurs déterminées par la méthode dite du « condensateur en coin » [C 7]. Le dispositif expérimental comporte alors deux électrodes planes formant un dièdre de faible ouverture et dont l'une est recouverte d'une couche isolante. L'application d'une tension entre ces électrodes conduit à la production de décharges dans le gaz de remplissage, donc à un dépôt de charges sur l'isolant, (que l'on peut visualiser par poudrage), dans une zone délimitée par des parallèles à la droite d'intersection des plans que définissent les électrodes et dont la largeur et l'emplacement se déduisent, pour une configuration géométrique donnée, de la valeur de la tension appliquée et de la courbe de Paschen du gaz de remplissage, l'air en l'occurrence. On constate une remarquable concordance de ces résultats avec ceux obtenus au moyen d'électrodes sphériques.

C. — PASCHEN CURVE FOR AIR

by G. WIND

Air constitutes a natural electrically insulating medium and, probably for this reason, air breakdown at atmospheric pressure and ambient temperature, has been the object of many investigations.

A great number of publications, national or international standards [C 1 - C 6], reproduce tables with values of air breakdown voltages, at atmospheric pressure (1.013 bar) and at temperatures of 20 °C or 25 °C.

Air breakdown voltages were mainly measured between spherical electrodes, for different gaps, d , normally in the range of between 0.5 and 1,500 mm. The spheres diameter, D was chosen in relation to this distance so that air breakdown takes place in a quasi-uniform electric field. Experiment shows that the electric field cannot be considered to be uniform when d becomes higher than 0.5 D .

Values of breakdown voltages are practically independent of voltage wave form (d.c., a.c., negative and positive impulse 1/50 μ s voltages). However, measured values with positive impulse voltages are slightly higher than those in the other cases, provided that when the distance between spheres of a given diameter increases it remains lower than 0.5 D .

The values of breakdown voltages used to draw the Paschen Curve in Figs. C 1 and C 2, respectively with log-log and linear scale, were only those obtained under uniform field conditions.

Nevertheless and as a confirmation of the general feature of Paschen's Law, it seemed interesting to include in Figure C 1 the values measured by the "Dihedron Capacitor" method [C 7]. This experimental device is made up of two plane electrodes, forming a dihedron with a weak divergence of which one electrode is covered by an insulating coating. Discharges in the filling gas are produced by application of voltage between the electrodes. Electric charges (which can be located by powder) are deposited on the insulating coating in a zone bounded by two straight lines parallel to the intersection line of the planes defining the electrodes. Width and place of this zone are deduced, for a given geometric configuration, from the value of the applied voltage and from the Paschen curve of the filling gas, air in this case. A remarkable agreement of these results with those obtained using spherical electrodes can be observed.

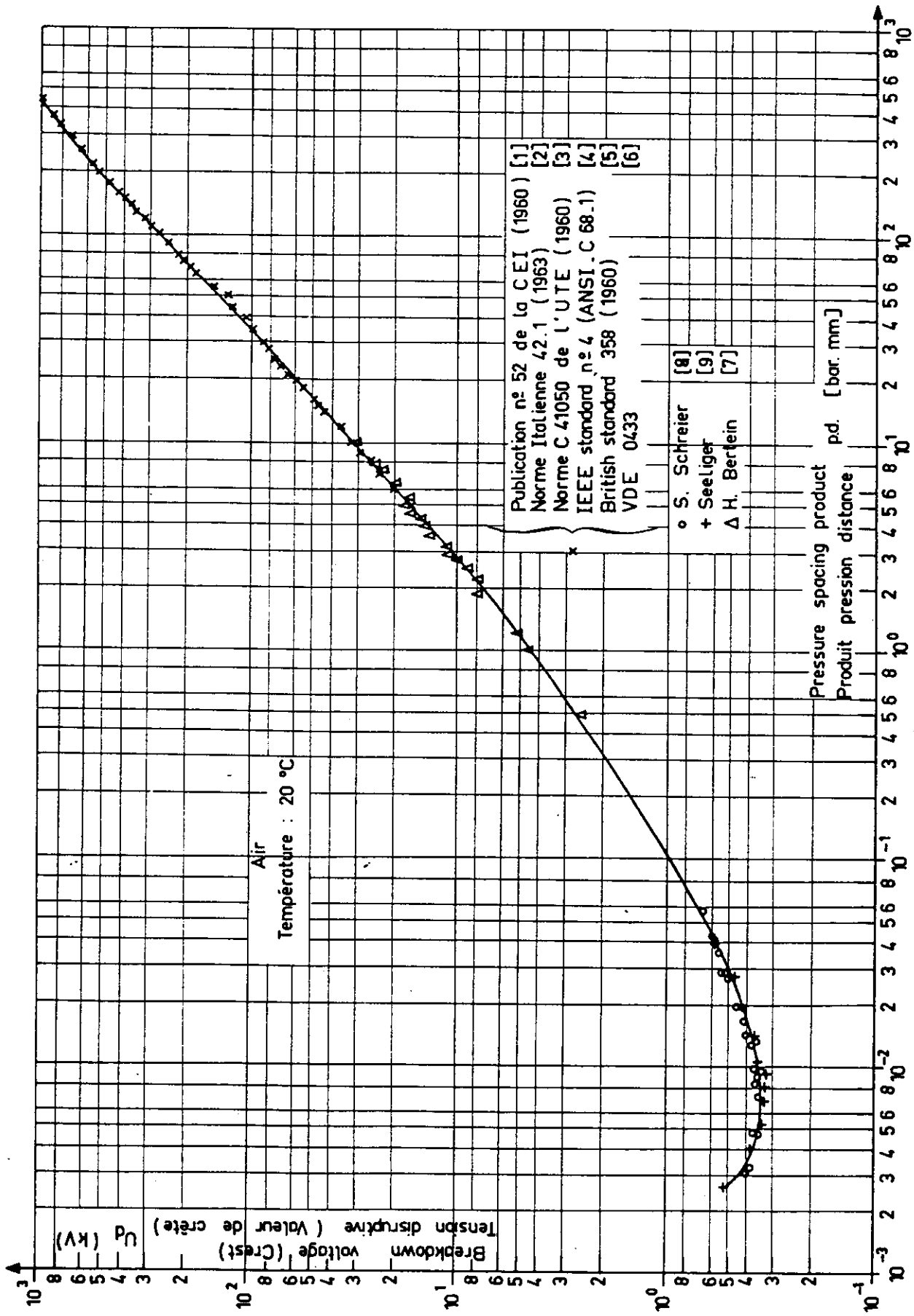


FIGURE C1

Courbe de Paschen pour l'air en échelles logarithmiques. Température 20 °C.
Paschen Curve for Air in log-log scale. Temperature 20 °C.

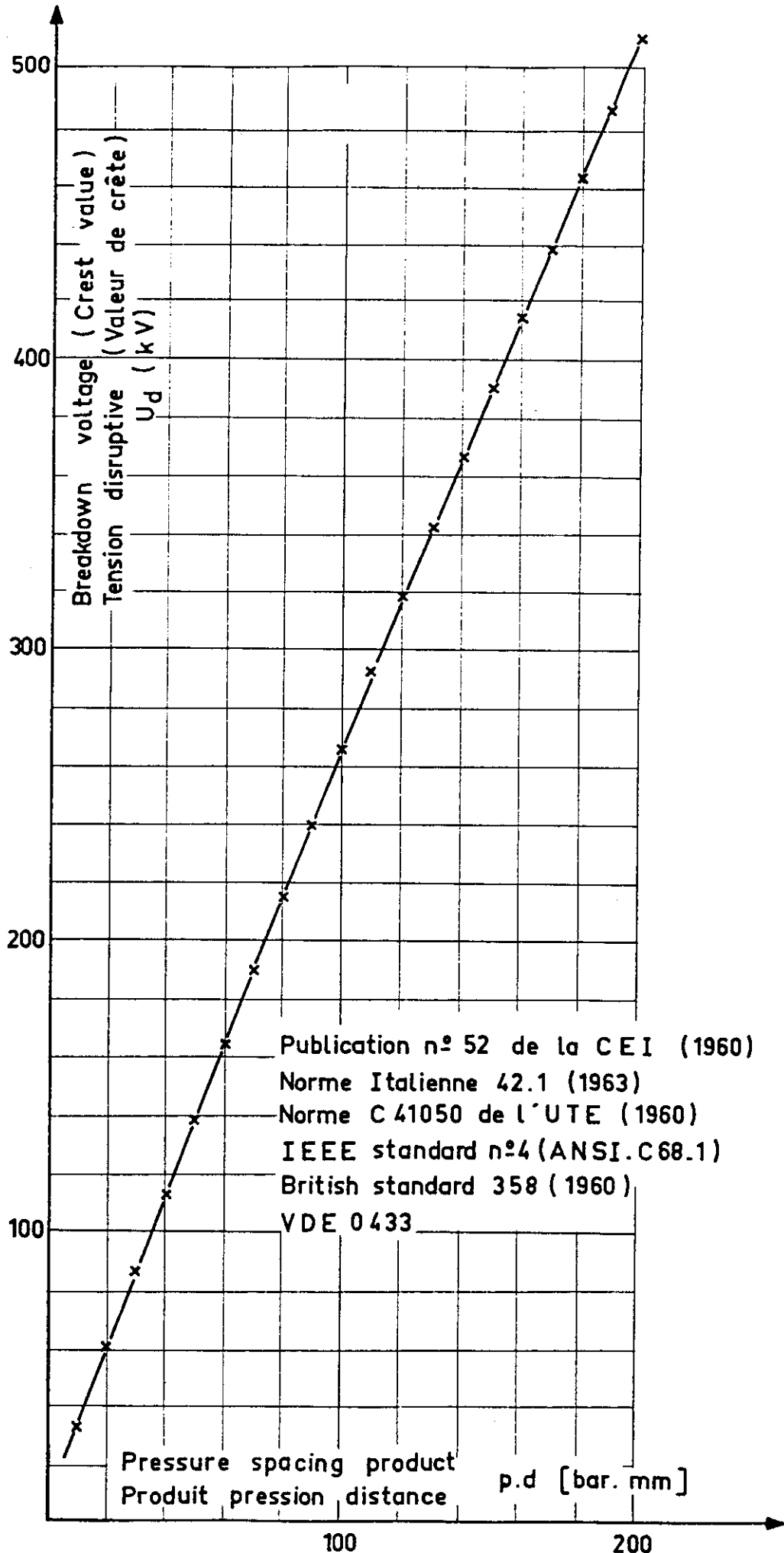


FIGURE C2
 Courbe de Paschen pour l'air en échelles linéaires. Température 20 °C.
 Paschen Curve for Air in linear scale. Temperature 20 °C.

TABLEAU C 1 - TABLE C 1

Rupture diélectrique de l'air dans un champ uniforme. Courbes de Paschen.

Air breakdown in a uniform field. Paschen curves

Température 20°

Auteurs et références Authors and references	Publication n° 52 de la CEI (1960) [C1] Norme italienne 42-1 (1963) [C2] Norme C 41050 de l'UTE (1960) [C3] IEEE Standard n° 4 (ANSI-C68-1) [C4] British Standard 358 (1960) [C5] VDE 0433 [C6]	II. Bertin [C7] IEEE vol. 75, 1966, n° 2, page 165 Etude du seuil de la décharge gazeuse en présence d'une paroi isolante.	S. Schreier [C8] IEEE Trans, PAS, vol. 83 n° 5, page 468 On the breakdown voltages of some electronegative gases at low pressures	Seeliger [C9] Leipzig, Verlag, J.A. Barth page 183 Einführung in die Physik der Gasentladungen	G. Camilli, TW. Liao, RE. Plump [C10] AIEE, Pt 1, vol. 74, 1955, page 637 The dielectric behavior of some fluorogases and their mixtures	AM. Zaleskii, AI. Poltev [C11] Elektrichestvo, n° 11, 1963, pages 57 - 61 Electrical Strength of air, hydrogen and SF ₆ at high pressures
Symboles sur graphiques Symbol on graph	x	A	o	+		
Electrodes						
Type	sphères spheres	Planes, //	Planes, //	Planes, //	Planes, //	Planes, //
Nature	Laiton Brass	Laiton Brass	Laiton Brass	chromées. chrome-plated	chromées. chrome-plated	non précisé not mentioned
Fini Finish	polies polished	non précisé not mentioned	non précisé not mentioned	non précisé not mentioned	non précisé not mentioned	polies polished
Diamètre (mm) Diameter	50 ↔ 2000	101,5	76,2	80	80	80
Coins arrondis Rounded edges		oui yes r = 3,2 mm	oui yes	oui yes r = 8 mm	oui yes r = 8 mm	oui yes r = 8 mm
Température de l'air durant l'essai Air temperature during the test	20 et 25 and	22	25	21	25	température ambiante room temperature
Nature de la tension appliquée Applied voltage	Fréquence industrielle Industrial frequency Tension de choc positive et négative Positive and negative impulse voltage (50 %)	continue d.c.	~ 60 hertz	non précisé not mentioned	~ 60 hertz	~ 50 hertz
Pression Pressures	1	1	3.10 ⁻³ ↔ 125.10 ⁻³	non précisé not mentioned	1	5 ↔ 14
Distances Gaps	5 ↔ 400	variable	0,33 ↔ 1	non précisé not mentioned	7 ↔ 53	20
Variations de p.d. (bar. mm) Variations of p.d.	5 ↔ 400	0,5 ↔ 10	3.10 ⁻³ ↔ 56.10 ⁻³	2,6.10 ⁻³ ↔ 40.10 ⁻³	7,57 ↔ 53,5	100 ↔ 284

La rupture diélectrique de l'air à des pressions inférieures à la pression atmosphérique a également fait l'objet d'études expérimentales. La recherche de moyens permettant de diminuer les risques de défaillance de matériels électriques destinés à fonctionner à haute altitude ou dans des satellites a conduit à multiplier les mesures de la tension disruptive de nombreux gaz au voisinage du minimum de Paschen, notamment de gaz électronégatifs et de l'air, les valeurs relatives à ce dernier ayant été déterminées dans les mêmes conditions à titre de référence [C 8]. Les valeurs de la tension disruptive ainsi relevées pour une pression comprise entre $3 \cdot 10^{-3}$ et $125 \cdot 10^{-3}$ bar ont été reportées en figure C 1. Elles sont très voisines de résultats obtenus antérieurement [C 9], mais au sujet desquels les conditions de mesure ne sont pas connues avec précision.

Quelques publications font état de mesures de tensions disruptives de l'air à des pressions égales ou supérieures à la pression atmosphérique dans des configurations de champ proches de celles qui nous intéressent [C 10, C 11]. Les valeurs qu'elles mentionnent, qui devraient normalement se placer sur la branche ascendante de la courbe de Paschen sont dans leur ensemble nettement inférieures à celles

Air breakdown, at pressures lower than atmospheric pressure, was also studied. In order to study ways of reducing failure risks in electric equipment working at high altitudes or in satellites, breakdown voltage values were measured near the Paschen minimum, for many gases, especially electronegative gases with air as a reference, under the same conditions [C 8]. The values, measured when air pressure is between $3 \cdot 10^{-3}$ and $125 \cdot 10^{-3}$ bars, are shown in Fig. C 1. They are in very close agreement with earlier results [C 9] but their conditions of measurement are not fully known.

Some publications give air breakdown voltages when pressure is equal to or higher than atmospheric pressure, with field configurations near to those of interest to us [C 10], [C 11]. The values mentioned in these publications and which would normally be plotted on the right hand part of the Paschen curve are generally lower than values which would be deduced from Figs. C 1 and C 2.

TABLEAU C 2 - TABLE C 2
Tensions disruptives de l'air dans un champ uniforme
Breakdown voltages of air in a uniform field
Température 20 °C. Valeurs relevées sur la courbe de Paschen.
Values of the Paschen curve (fig. C 1 & C 2).

Produit pression distance <i>Pressure Spacing Product</i> bar.mm	Tension disruptive, valeur de crête <i>Breakdown Voltage, Crest</i> kV	Produit pression distance <i>Pressure Spacing Product</i> bar.mm	Tension disruptive, valeur de crête <i>Breakdown Voltage, Crest</i> kV	Produit pression distance <i>Pressure Spacing Product</i> bar.mm	Tension disruptive, valeur de crête <i>Breakdown Voltage, Crest</i> kV
$2.6 \cdot 10^{-3}$	0,520	0.5	2,7	110	292
$3 \cdot 10^{-3}$	0,440	1	4,5	120	318
$4 \cdot 10^{-3}$	0,380	1,5	6,0	130	342
$5 \cdot 10^{-3}$	0,350	2	7,5	140	366
$6 \cdot 10^{-3}$	0,340	3	11,2	150	390
$8 \cdot 10^{-3}$	0,340	4	14,2	160	414
$1 \cdot 10^{-2}$	0,360	5	16,8	170	438
$2 \cdot 10^{-2}$	0,430	6	19,9	180	462
$3 \cdot 10^{-2}$	0,500	8	26,0	190	486
$4 \cdot 10^{-2}$	0,580	10	31,7	200	510
$5 \cdot 10^{-2}$	0,650	15	45,5	220	560
$6 \cdot 10^{-2}$	0,700	20	59,0	240	610
$8 \cdot 10^{-2}$	0,820	30	86,0	260	660
$1 \cdot 10^{-1}$	0,980	40	112	280	705
		50	138	300	750
		60	164	320	795
		80	215	340	840
		100	266	360	885
				380	935
				400	980

que l'on déduirait des figures C 1 et C 2. Mais étant donné l'incertitude pouvant résulter, dans le cas des dispositifs utilisés, d'une influence éventuelle des parois des cellules expérimentales ou de la non uniformité du champ électrique, il a pour le moment paru préférable de ne pas tenir compte des points correspondants pour tracer la courbe de Paschen.

D'autres données expérimentales en matière de tensions disruptives de l'air, dont on connaîtrait d'une part suffisamment les conditions d'obtention et qui seraient d'autre part en relation directe avec la loi de Paschen font encore défaut et il s'avère ainsi que les renseignements dont on dispose actuellement ne sont pas assez nombreux pour que l'on puisse esquisser les limites, dans le domaine des pressions élevées, de la validité de la loi de Paschen pour l'air.

But, because of the uncertainties with the apparatus used arising from a possible influence of the walls of the test cells and of the non uniform field on breakdown, it seemed best not to include the data on the graph of the Paschen curve.

Other experimental values of air breakdown voltages, of which test conditions would be sufficiently known and which would be directly appropriate to Paschen's Law have not yet been found.

At present the data available are not sufficient to indicate the limits of the validity of Paschen's Law for air in the high pressure range.

Références pour l'air — References for air

- [C1] Publication IEC n° 52 (1960).
- [C2] Norme italienne 42.1 (1963) (Italian Standard).
- [C3] Norme C 41050 UTE (1960) (French Standard).
- [C4] IEEE Standard n° 4 (ANSI. C 68.1).
- [C5] British Standard 358 (1960).
- [C6] VDE 0433 (German Standard).
- [C7] H. BERTEIN. — *RGE*, Vol. 75, 1966, n° 2, p. 165.
- [C8] S. SCHREIER. — *IEEE Trans. PAS.*, Vol. 83, n° 5, p. 468.
- [C9] R. SEELIGER. — Leipzig Verlag JA Barth, p. 183, (1934).
- [C10] G. CAMILLI, T.W. LIAO, R.E. PLUMP. — *AIEE*, Pt. I, Vol. 74, (1955) p. 637.
- [C11] A.M. ZALESSKII, A.I. POLTEV. — *Elektrichestvo*, n° 11, 1963, p. 57-61.

D. — COURBE DE PASCHEN POUR L'HEXAFLUORURE DE SOUFRE (SF₆)

par G. LUXA, G. OPPERMAN, J. VIGREUX,
H. WINKELNKEMPER

Aperçu historique et domaine d'application du SF₆ en haute tension

Le SF₆ fut fabriqué pour la première fois en 1900 par H. MOISSAN et P. LEBEAU à partir du fluor et du soufre. Les premières recherches d'envergure furent menées en 1939 par H.G. Pollock et F.S. Cooper qui étudièrent le comportement électrique du SF₆ en champ divergent sous tension continue. Au cours des années suivantes les recherches portèrent principalement sur la stabilité chimique de ce gaz soumis à des décharges électriques. Au début des années cinquante l'intérêt technique de ce gaz en tant qu'isolant dans l'électrotechnique des hautes tensions devint évident. Parmi les publications datant de cette époque, on peut citer en particulier celles de G. Camilli, G.S. Gordon, R.E. Plump [D 14], C.N. Works et T.W. Dakin [D 20] qui ont étudié la rigidité diélectrique du SF₆ en champ inhomogène

D. — PASCHEN CURVE FOR SULFUR HEXAFLUORIDE (SF₆)

by G. LUXA, G. OPPERMAN, J. VIGREUX,
H. WINKELNKEMPER

Historical background and scope of SF₆ at high voltages

SF₆ was first obtained from fluorine and sulphur in 1900 by H. Moissan and P. Lebeau [D 12]. The first comprehensive investigations into the electrical behaviour of SF₆ in non-uniform fields under d.c. voltage were carried out in 1939 by H.G. Pollock and F.S. Cooper [D 13]. In the following years a great deal of attention was focussed on research into the chemical stability of this gas when subjected to electrical discharges. In the early fifties technical interest in the gas as insulating material for high voltage technology became evident. Of the articles published at this time one should draw special attention to the investigations of G. Camilli, G.S. Gordon, R.E. Plump [D 14] and C.N. Works, T.W. Dakin [D 15] on the breakdown behaviour of SF₆ in non-uniform fields under a.c. and impulse volt-

sous tensions alternatives et de choc. Une bibliographie complète sur le SF₆ a été établie par la firme Kali-Chemie de Hanovre. Elle comprend 1 500 références.

Entre-temps, le SF₆ a trouvé de nouveaux champs d'applications industrielles. Il est utilisé comme :

- fluide d'extinction de l'arc dans les disjoncteurs,
- gaz isolant dans l'appareillage et les installations.

On l'utilise en particulier dans les appareils suivants :

- postes blindés,
- conduites électriques et câbles imprégnés au SF₆,
- transformateurs isolés et refroidis au SF₆,
- condensateurs de mesure pour très hautes tensions,
- générateurs électrostatiques,
- installations de rayons X.

L'excellente expérience acquise dans tous les domaines lors de l'utilisation du SF₆ permet de prévoir une extension de ses applications. Son développement est actuellement très important dans le domaine des réseaux électriques de transport. Dès à présent de nombreux postes blindés d'une tension au moins égale à 362 kV, sont en service. Les problèmes, pour atteindre 500 kV, sont bien explorés. Les travaux de développement ultérieurs ont pour objectif le matériel pour 765 kV et des recherches sont entreprises pour les tensions supérieures à 1 000 kV [D 16].

Diverses études ont été publiées depuis 1955 sur la courbe de Paschen relative au SF₆ [D 1] à [D 11]. Cependant, les auteurs de ces travaux n'ont pas utilisé les mêmes paramètres d'essais, et n'ont publié que d'une façon incomplète leurs modes opératoires. Par suite, on ne pourra comparer entre eux qu'un très petit nombre de résultats expérimentaux surtout dans le domaine des pd s'étendant au-delà de 10 bar.mm. De plus, il n'a souvent pas été tenu compte du fait que le domaine de validité de la loi de Paschen était étroit. Ceci explique que pour des valeurs élevées du produit pd , le rapport des limites supérieures et inférieures des tensions disruptives mesurées peut être supérieur à 2. Sur les graphiques, les points expérimentaux se répartissent donc sur une surface importante. On peut lever cette indétermination en traçant les courbes U_d en fonction de pd avec d comme paramètre. On fait ainsi clairement apparaître les limites de validité de la loi de Paschen. Dans le domaine de validité de la loi, les points se placent sur une seule courbe, quelle que soit la valeur du paramètre. En dehors de ce domaine, les courbes relatives à des valeurs définies du paramètre s'écartent les unes des autres. Les points expérimentaux se placent alors sur leurs courbes respectives avec une dispersion caractérisée par un écart type de quelques pour-cent. Pour cette raison, il y a lieu d'utiliser le paramètre d pour construire la courbe de Paschen avec les données disponibles. En conséquence, on

ages. A comprehensive bibliography on SF₆ containing a good 1 500 titles so far has been compiled by the firm Kali-Chemie in Hannover, Germany.

SF₆ has since found a wide variety of applications in the field of high voltage technology. It is used as an :

- arc quenching medium in circuit-breakers;
- insulating medium in instruments and equipment.

As an insulating medium in high voltage technology it has already been used in the following fields :

- metalclad substations,
- wires and SF₆ impregnated cables,
- SF₆-insulated and cooled transformers;
- measuring capacitors for extremely high voltages;
- electrostatic generators;
- X-ray equipment.

The excellent experience obtained with SF₆ in all fields of application gives grounds for expecting a further extension of the use of this gas in high voltage technology. The development in the field of electrical transmission systems is for example particularly intensive. Many metal-clad substations for voltages up to 362 kV are already in service.

The problems with voltages up to 500 kV have already been extensively investigated. Further development is concentrating on equipment for 765 kV and research projects for voltages above 1 000 kV have been started [D 16].

A number of articles on the Paschen curve of SF₆ have been published since 1955 [D 1 - D 11]. The test parameters in these investigations were not all the same and, in many cases, the test conditions were not fully described. Therefore only a limited comparison of the test results is possible, especially in the $p.d.$ range above 10 bar.mm. Furthermore, in most investigations, the fact that the range of Paschen's Law is limited was not taken into consideration. This also explains the phenomenon that at higher $p.d.$ values the upper and lower limit of measured values of the breakdown voltage plotted versus the product $p.d.$ differ by a factor of more than 2. This wide band of test values can be resolved by plotting U_d versus the product $p.d.$ with the spacing d as parameter. Such a graph shows clearly the limits of Paschen's Law: in the range for which the law holds, the test values, independent of the parameter-value, coincide in one curve; outside the range of validity these curves deviate distinctly, the single branches having standard deviations of a few percent only. For this reason the parameter d is to be used for plotting the Paschen curve according to the test values available. This means, however, that only those test values where the spacing is indicated can be used. These are mainly the results of the investigations in this field undertaken at the High Voltage Institute of the Technical University in Berlin since 1969 (partly published in [D 10]). From the beginning,

TABLEAU D 1 - TABLE D 1
 Conditions d'essais relatives aux références pour le SF₆
 Details of breakdown tests of references for SF₆

Auteurs et références Authors and references		S. Schreier [D 3] Breakdown Voltages of Electronegative Gases at Low Pressures (IEEE Trans., Vol. Pas 83, 1964 p. 468-471)	D.W. George, P.H. Richards [D 5] Electrical Field Breakdown in SF ₆ (Brit. J.A.P. Ser. 2 Vol. 2 1969, pp. 1470-1471)	M. Nakamuta [D 6] Paschen Curves in Various Gases (The Standing Committee on Electrical Discharge of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 1970)	J. Dutton, F.M. Harris, H.J. Jones [D 7] Departures from Paschen's Law for Sulphur Hexafluoride (Proc. IEE, Vol. 118 N° 5, 1971, pp. 732-733.
Symbole sur graphiques Symbol on graph		x	Δ	○	□
Electrodes	Type	planes,	planes,	Rogowski	Bruce
	Nature	laiton brass	inox stainless steel	nickel	argentées silver
	Fini Finish	-	poli, formées polished, conditioned	degassed	formées conditioned
	Diamètre Diameter	102 mm	50,8 mm planes	250 mm, 60 mm	110 mm planes 300 mm
	Coins arrondis Rounded edges	r = 3,2 mm	r = 6,4 mm	oui yes	oui yes
Température du SF ₆ durant l'essai SF ₆ temperature during the test		-	0°C	20°C	0°C
Tension appliquée Applied voltage		~ 60 Hz	continue dc	~ 50 Hz/continue ~ 50 Hz/dc	continue dc
Pression Pressures (bar)		0,003-0,047	0,008-0,9	0,00016-2,5	0,25-0,5
Distances Gaps (mm)		1	0,31 ; 3,75; 5,5 ; 10,14	10 ; 20	5-60
Variations de p.d Variations of p.d (bar.mm)		0,003-0,047	0,03-9,4	0,0016-50	1,5-32

ne pourra tenir compte que des mesures où le paramètre d a été relevé. C'est le cas des recherches entreprises depuis 1969 par l'Institut des Hautes Tensions de l'Université Technique de Berlin (en partie publiées dans [D 10]). Dès le début, on a prêté un intérêt particulier à la signification des limites de la loi Paschen et à la disruption au-delà de ces limites.

La courbe de Paschen est présentée sur deux diagrammes complémentaires. En figure D 1 elle est donnée en échelles logarithmiques, et en figure D 2 en échelles linéaires avec l'indication des déviations par rapport à la loi de Paschen.

Les travaux [D 3], [D 5], [D 6], [D 7], [D 8], [D 10] et [D 11] ont servi de base pour le tracé de la courbe de Paschen relative aux valeurs de pd inférieures à 10 bar.mm. Quelques-uns des paramètres d'essais sont indiqués tableau D 1. On n'a retenu que des investigations dont les résultats se situent à l'intérieur du domaine de validité. Cette

interest has been focussed chiefly on the significance of the limits of Paschen's Law and the breakdown behaviour outside these limits.

The Paschen curve is presented in two complementary diagrams. In Fig. D 1 it is shown in a log-log scale and in Fig. D 2 in a linear scale with indication of deviations from Paschen's Law.

Refs. [D 3], [D 5], [D 6], [D 7], [D 8], [D 10], [D 11] were used as a basis for the Paschen curve in the lower p.d. range up to 10 bar.mm. The test parameters are shown in Table D 1. Only those investigations have been considered whose values fall within the range for which Paschen's Law holds. This prerequisite is fulfilled if two rough limits

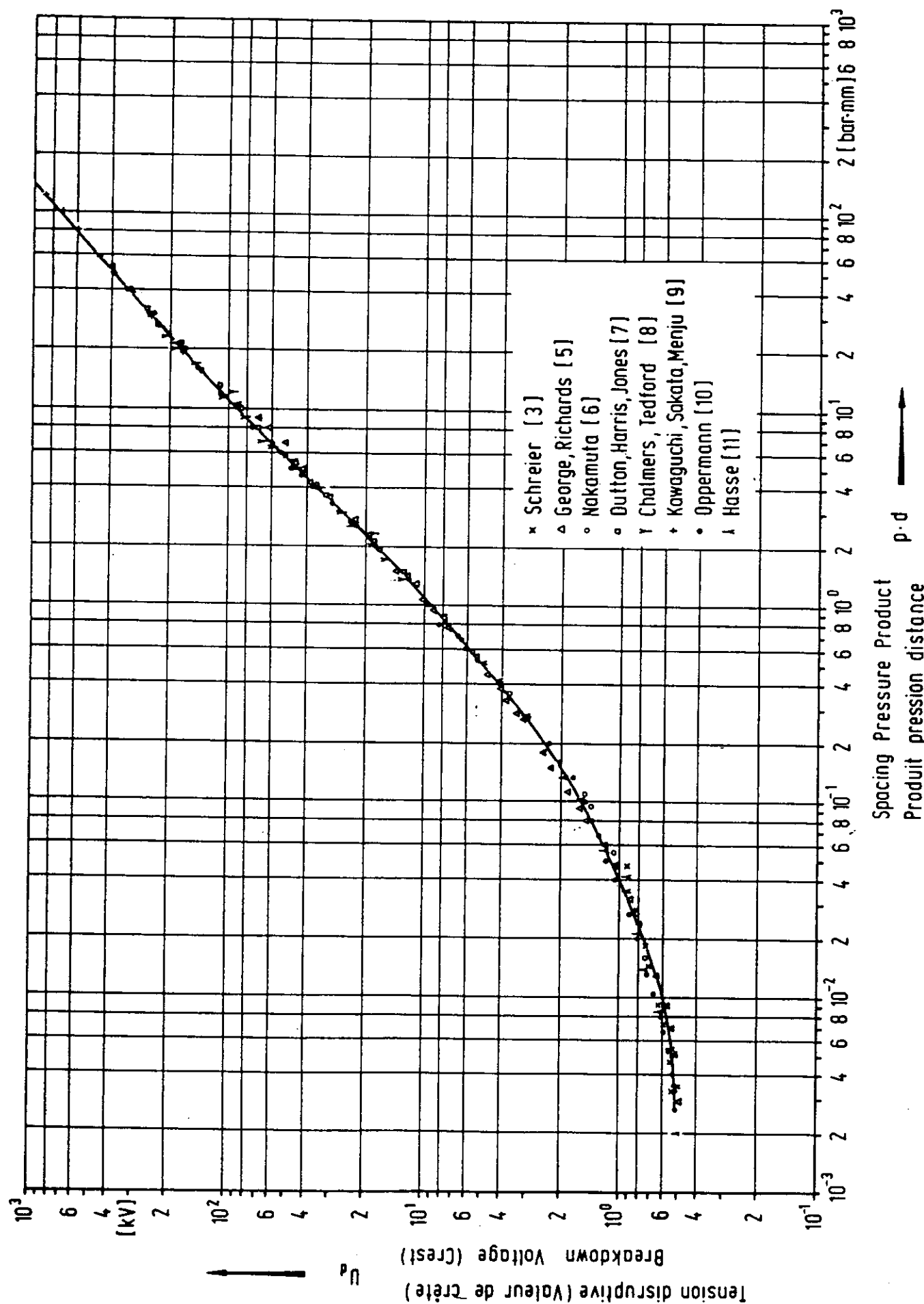
I.D. Chalmers, D.J. Tedford [D8] Spark Breakdown in Sulphur Hexafluoride and Arcton 12 (Proc. IEE, Vol. 118 N° 12, 1971, pp. 1893-1894)	Y. Kawaguchi, K. Sakata, S. Menju [D9] Dielectric Breakdown of Sulphur Hexafluoride in Nearly Uniform Fields (IEEE Trans. Vol. 90 N° 3, 1971, pp. 1072-1078)	G. Oppermann [D10] Die Paschen-Kurve und die Gültigkeit des Paschen-Gesetzes für Schwefelhexafluorid (Internationales Symposium Hochspannungstechnik, München, 1972, pp. 378-385)	P. Hasse [D11] Die Entwicklung des elektrischen Durchschlags im homogenen Feld in SF ₆ im Vergleich mit Luft (Dissertation, Technische Universität Berlin, 1972)
Y	+	•	λ
Bruce	Rogowski	Rogowski	Rogowski
inox stainless steel	nickel	inox stainless steel	inox stainless steel
polies polished	polies polished	poli, formées polished, conditioned	formees conditioned
60 mm planes 180 mm	430 mm	40 mm planes 90 mm	20 mm planes 90 mm
oui yes	r = 50 mm	oui yes	oui yes
20°C	20°C	25°C	25°C
continue dc	50 Hz	50 Hz/continue 50 Hz/dc	continue dc
0.133-2,67	1 : 2 : 3 : 4	0,0013-20	0,013-2
5-50	20 : 30 : 40 : 50 : 60	1-25	1-20
0,65-24	20-160	0,0025-200	0,002-20

exigence est satisfaite quand on respecte en plus deux conditions aux limites qui sont approximativement les suivantes : $d \geq 0,3$ mm et $p \leq 2$ bar. Dans ces conditions, et toutes choses étant égales par ailleurs, tensions disruptives continues et alternatives concordent très bien. Les différences sont inférieures à l'incertitude sur les mesures. La dispersion des mesures est très faible lorsqu'elles sont effectuées dans des conditions expérimentales soignées [D 11]. A cause de cette faible dispersion, l'irradiation de l'espace interélectrodes n'a aucune influence appréciable dans ce domaine de valeurs de pd. La même chose est valable pour différents matériaux d'électrodes, comme par exemple l'acier inoxydable, l'aluminium, l'argent, le nickel et le cuivre.

La courbe de Paschen relative au SF₆ techniquement pur est représentée figure D 1, sur laquelle on a reporté les résultats obtenus par les divers auteurs. En outre, on trouvera dans le tableau D 2 les valeurs jusqu'à 10 bar·mm publiées par les différents au-

are observed for the product p.d.; i.e. $d \geq 0.3$ mm and $p \leq 2$ bar. Under these circumstances, all other test conditions being equal, the breakdown values for a.c. and d.c. voltages largely coincide. The differences are within the limits of measurement accuracy. Under careful test conditions there is only an extremely small scatter [D 11]. Because of this small scatter, the influence of irradiation of the gap is practically negligible in this p.d-range for a.c. and d.c. voltages. The same is true of the different electrode materials, e.g. stainless steel, aluminium, silver, nickel and copper.

The Paschen curve for technically clean SF₆ with the authors' individual points is shown in Fig. D 1. Moreover, the values up to 10 bar·mm and the maximum deviations of the test values of the individual authors are indicated for several small p.d



Courbe de Paschen pour le SF₆ en échelles logarithmiques. Température 25 °C.
 Paschen Curve for SF₆ in log-log scale. Temperature 25 °C.

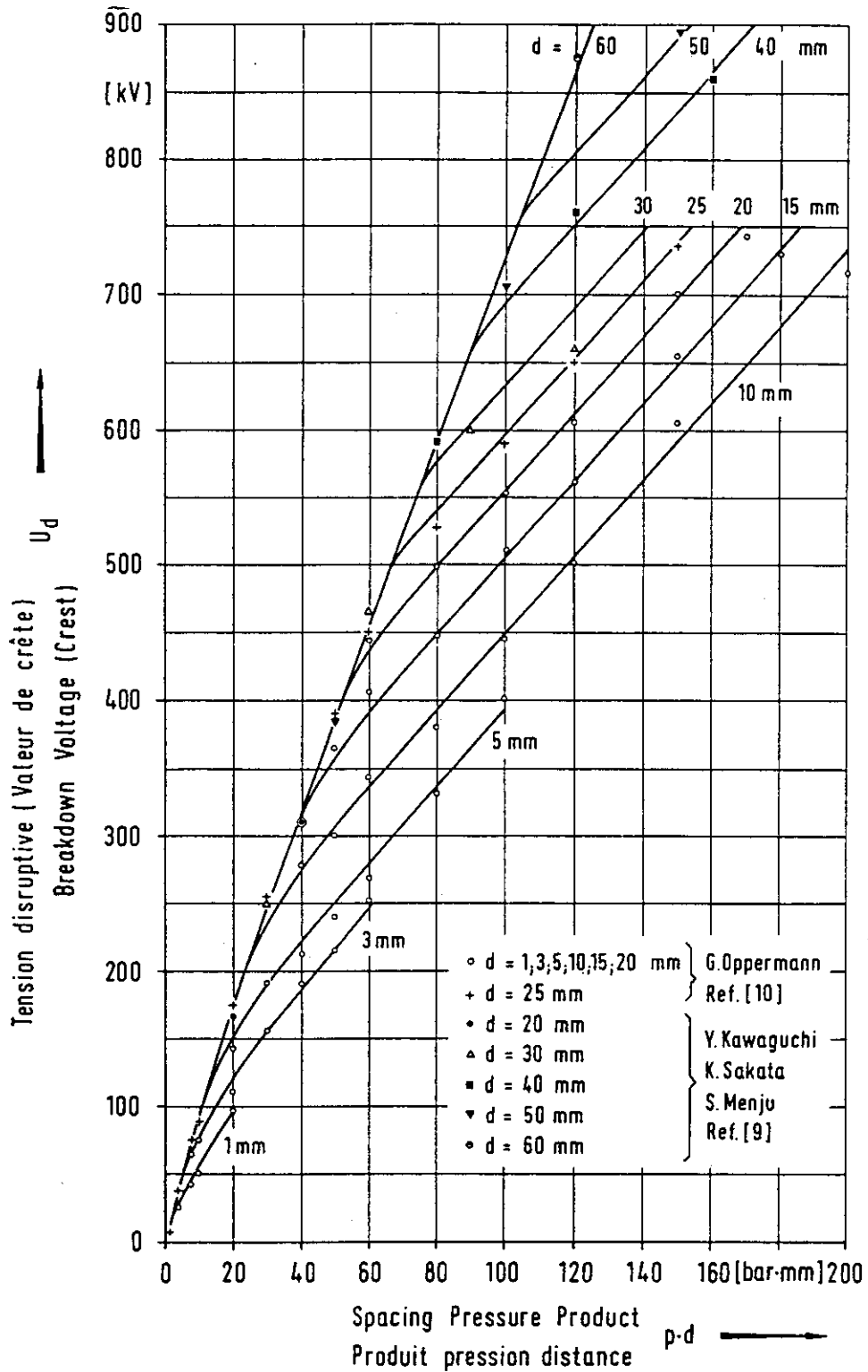


FIGURE D2

Courbe de Paschen pour du SF₆ techniquement pur en échelles linéaires. Température 25 °C.

Paschen Diagram for technically clean SF₆ (a.c.) in linear scale. Temperature 25 °C.

teurs avec l'indication des écarts maximaux enregistrés au cours des mesures. Le minimum de la courbe de Paschen peut être déterminé expérimentalement lorsque la décharge entre des électrodes ayant un profil de Rogowski passe de la surface plane sur les bords, ce qui se produit quand la

ranges in Table D 2. The minimum of the Paschen curve can be experimentally found when the spark paths between electrodes with a Rogowski profile shift from the flat region to the edge; this occurs when the $p \cdot d$ value decreases below the minimum point. In this way, G. Oppermann [D 10] determin-

TABLEAU D 2 - TABLE D 2
Tensions disruptives du SF₆
dans un champ uniforme

Breakdown voltages of SF₆ in uniform field

Valeurs relevées sur la courbe de Paschen (fig. D 1) jusqu'à 10 bar.mm avec indications de l'écart maximal entre les résultats des mesures obtenues par chaque auteur.

Values of the Paschen curves (Fig. D 1) up to 10 bar. mm, with indications of the maximum deviation of measurement results of individual authors.
Température : 25 °C, $p \leq 2$ bars, $d \geq 0,3$ mm

Produit Pression Distance Spacing Pressure Product bar . mm	Tension disruptive Valeur de crête Breakdown Voltage, Crest kV	Ecart maximal entre les résultats de mesures (%) Maximum Deviation of Measurement Results (%)						
		Ref. [D3]	Ref. [D5]	Ref. [D6]	Ref. [D7]	Ref. [D8]	Ref. [D10]	Ref. [D11]
3,5 · 10 ⁻³ (Paschen-Minimum)	0,507	+ 1,6 - 0	+ 0 - 3,3	- -	- -	- -	+ 0 - 0	+ 1,1 - 0
5,0 · 10 ⁻³ 7,0 · 10 ⁻³ 9,0 · 10 ⁻³	0,535 0,562 0,598	+ 1,7 - 6,8	+ 0 - 3,7	- -	- -	- -	+ 4,8 - 0	+ 0 - 3,5
1,0 · 10 ⁻² 1,5 · 10 ⁻² 2,0 · 10 ⁻² 3,0 · 10 ⁻² 4,0 · 10 ⁻² 6,0 · 10 ⁻² 8,0 · 10 ⁻²	0,610 0,695 0,755 0,895 1,00 1,20 1,40	+ 0,7 - 6,4	+ 5,2 - 4,1	+ 3,5 - 8,6	- -	- -	+ 6 - 1,4	+ 6,4 - 3,5
1,0 · 10 ⁻¹ 1,5 · 10 ⁻¹ 2,0 · 10 ⁻¹ 3,0 · 10 ⁻¹ 4,0 · 10 ⁻¹ 6,0 · 10 ⁻¹ 8,0 · 10 ⁻¹	1,58 2,01 2,42 3,28 4,19 6,00 7,65	- -	+ 11,6 - 5,3	+ 7,2 - 0,1	- -	+ 3,0 - 1,5	+ 5,3 - 4,6	+ 4,8 - 3,8
1,0 1,5 2,0 3,0 4,0 6,0 8,0 10,0	9,5 14,0 18,1 26,9 35,5 53,5 70,5 89,0	- -	+ 7,0 - 15,0	- -	+ 0 - 2,8	+ 15,2 - 7,6	+ 6,1 - 1,1	+ 2,5 - 4,2

valeur de $p d$ devient inférieure à la valeur correspondant au minimum. G. Oppermann [D 10] a trouvé de cette façon le minimum en tension alternative et continue, comme étant de 507 V à $3,5 \cdot 10^{-3}$ bar.mm.

Les écarts des valeurs mesurées par les différents auteurs (tableau D 2) sont étonnamment faibles. Les différences qui subsistent sont probablement causées surtout par des difficultés inhérentes aux mesures de pression.

On ne peut utiliser pour le tracé de la courbe de Paschen en échelle linéaire avec d comme paramètre (figure D 2), que les références [D 9] et [D 10], car seules ces publications donnent des indications

ed the minimum for d.c. and a.c. voltages to be 507 V at $3,5 \cdot 10^{-3}$ bar.mm.

The variations of the test values obtained by the various authors are surprisingly small as shown in Table D 2. The remaining differences are presumably caused mainly by the difficulties involved in pressure measurement.

As a basis for the Paschen diagram in linear scale with the parameter d in Fig. D 2 only Refs. [D 9] and [D 10] can be used since only in these publications the parameters of the test values have been

sur les paramètres d'essais. En outre, ces travaux sont les seuls dont le champ de recherches s'étend jusqu'à 400 kV. Des valeurs de comparaison, valables seulement pour la courbe limite de gauche du diagramme en figure D 2, peuvent être trouvées dans les publications [D 6], [D 7], [D 8], pour des tensions allant respectivement jusqu'à 400 kV, 260 kV et 210 kV (voir également en figure D 1). On trouvera dans le tableau D 3, les valeurs retenues pour l'établissement de la courbe. Les écarts maximaux par rapport à la courbe de Paschen de la figure D 2 s'établissent comme suit :

[D 6] + 3,5 % — 2,5 %
 [D 7] + 2,5 % — 4,0 %
 [D 8] + 4,0 % — 5,0 %

Les mesures relatives à des valeurs élevées de pd montrent qu'elles sont, contrairement à ce qui se passe dans la zone des faibles valeurs de pd (fig. D 1), non seulement fonction du paramètre d , mais également de la nature de la tension et des matériaux d'électrodes [D 10]. La tension disruptive avec des électrodes en aluminium peut être jusqu'à 20 % inférieure à celle obtenue avec des électrodes en acier inoxydable ou en nickel. Pour cette raison, il est nécessaire de tenir compte de tous les détails

stated. Moreover, these are the only investigations with voltages above 400 kV. Values for comparison that apply however only to the lefthand limiting curve of the diagram in Fig. D 2 are given in [D 6], [D 7] and [D 8] for voltage ranges up to 400 kV, 260 kV, and 210 kV respectively (see also Fig. D 1). The individual values of the diagram are stated in Table D 3. The maximum deviations from the Paschen curve in Fig. D 2 occur as follows :

[D 6] : + 3.5 % — 2.5 %
 [D 7] : + 2.5 % — 4.0 %
 [D 8] : + 4.0 % — 5.0 %

Apart from the influence of the parameter d , the results for the upper $p.d$ -values, in contrast to the lower $p.d$ -range (Fig. D 1), show considerable dependence of the type of voltage and the electrode material [D 10]. With aluminium electrodes the breakdown values can be up to 20 % smaller than with stainless steel or nickel electrodes. For this reason it is necessary to take the more exact test conditions into account when comparing the results from different investigations. [D 9] and [D 10] show

TABLEAU D 3 - TABLE D 3
 Tensions disruptives en courant alternatif du SF₆
 dans un champ uniforme

A.C. breakdown voltages of SF₆ in uniform field
 Valeurs relevées sur le diagramme de Paschen.
 Values of Paschen diagram (Fig. D 2).
 Température 25 °C.

Produit Pression Distance Spacing Pressure Product bar · mm	Tension disruptive (valeur de crête, 50 Hz) Breakdown Voltage (Crest, 50 Hz) kV												
	Distance Gap Spacing mm												
	1	2	3	5	8	10	15	20	25	30	40	50	60
1	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
4	26,5	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5
8	42,5	55,5	64,5	70,5	70,5	70,5	70,5	70,5	70,5	70,5	70,5	70,5	70,5
10	50,0	60,0	74,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0
20	98,0	103	120	150	168	170	170	170	170	170	170	170	170
30	—	144	155	190	217	240	253	253	253	253	253	253	253
40	—	177	185	220	250	275	303	310	310	310	310	310	310
50	—	—	216	248	275	305	356	385	385	385	385	385	385
60	—	—	250	278	305	340	395	440	455	455	455	455	455
80	—	—	—	335	370	390	450	500	535	580	580	580	580
100	—	—	—	395	430	450	505	555	595	635	730	730	730
120	—	—	—	—	485	505	562	610	650	685	750	805	870
140	—	—	—	—	535	565	620	668	715	748	808	865	(920)
160	—	—	—	—	585	618	678	725	768	(805)	865	(920)	(970)
180	—	—	—	—	—	680	733	(785)	(825)	(862)	(925)	(975)	(1025)
200	—	—	—	—	—	735	(790)	(840)	(880)	(920)	(975)	(1025)	(1075)

Les valeurs entre () sont extrapolées. Les valeurs figurant en dessous de la ligne brisée sont en dehors du domaine de validité de la loi de Paschen.

The values in () are extrapolated. The values below the heavy line lie outside the range for which Paschen's law holds.

des comptes rendus d'essais quand on veut comparer les résultats de différents travaux. Les travaux [D 9] et [D 10] ne font pas apparaître de divergences, ce qui est de grande importance pour les résultats. Les résultats expérimentaux de ces deux travaux s'enchaînent d'une façon continue et se complètent remarquablement.

La représentation paramétrique montre que la loi de Paschen n'est vérifiée que dans certaines limites. Elle définit les valeurs limites des divers paramètres. Pour chaque espacement, la tension U_d commence par suivre une courbe limite commune lorsqu'on fait croître $p.d$, puis s'écarte de cette courbe. Le point de raccordement indique la limite de validité de la loi de Paschen pour l'écartement en question. Cette limite est d'autant plus élevée que d est grand. On a délimité grossièrement sur le tableau D 3 le domaine de validité par des segments de droite épais. Les valeurs figurant en dessous de cette ligne brisée sont en dehors du domaine de validité de la loi.

On n'a pas encore élucidé d'une façon claire les raisons fondamentales de la limitation de la loi de Paschen. Il est intéressant de noter que pour des espacements de 1 à 25 mm la tension disruptive est directement proportionnelle à l'espacement, à la limite de validité de la loi de Paschen [D 10]. On peut en déduire que le champ électrique qui entraîne la disruption aux abords de la limite de validité a une valeur constante qui est, dans une large mesure, indépendante de la distance disruptive et de la pression du gaz. Elle s'élève à environ 20 kV/mm (crête) en tension alternative et à 16 kV/mm en tension continue. La valeur en tension alternative s'abaisse jusqu'à la valeur en tension continue ci-dessus lorsque la distance disruptive augmente jusqu'à 50 mm (voir [D 9]). Il n'existe pas, pour l'instant, de données expérimentales en tension continue relatives à des distances disruptives supérieures à 25 mm.

no difference that is of great consequence to the results. The values of both investigations correlate directly and agree with each other excellently.

The parameter graph shows that Paschen's Law holds only within certain limits and also defines these limits for the individual parameters. For each spacing, the breakdown voltage first traces a common boundary curve with increasing $p.d$ value and then deviates. Thus the point of deviation gives the limit of Paschen's Law for the spacing in question. The larger d is, the higher the threshold of deviation. In Table D 3 the validity limit is roughly indicated by a heavy line. The values below this line lie outside the range for which the law holds.

The cause of the limitations of Paschen's Law has not yet been unequivocally clarified. It is interesting to note that for spacings from 1 to 25 mm the breakdown voltage is directly proportional to the spacing at the limit of Paschen's Law (D 10). This means that the field strength which leads to breakdown at the limit of Paschen's Law has a constant value that is to a great extent independent of spacing and gas pressure, and which amounts to a mean value of approximately 20 kV/mm (crest value) for a.c. and 16 kV/mm for d.c. voltages. According to the test results of (D 9), the a.c. value decreases with larger spacings of up to 50 mm approximately to the d.c. value stated above. There are no test results available for d.c. breakdown for spacings larger than 25 mm.

Références pour le SF₆ — References for SF₆

- [D1] G. CAMILI, T.W. LIAO. — The Dielectric Behavior of Some Fluorogases and Their Mixtures (*AIEE Transactions*, Part I, 1955, p. 638).
- [D2] E.H. COHEN. — The Electric Strength of Highly Compressed Gases (*Proc. IEE*, Vol. 103 A, n° 7, 1956, pp. 57-67).
- [D3] S. SCHREIER. — Breakdown Voltages of Electronegative Gases at Low Pressures (*IEEE Trans.*, Vol. Pas 83, 1964, pp. 468-471).
- [D4] S.F. PHILP, J.G. TRUMP. — Maximum Gradient in kV/Meter Vs Pressure (*Conf. on elect. insulation*, NAS 1966).
- [D5] D.W. GEORGE, P.H. RICHARDS. — Electrical Field Breakdown in SF₆ (*Brit. J.A.P.*, Ser. 2, Vol. 2, 1969, pp. 1470-1471).
- [D6] M. NAKAMUTA. — Paschen Curves in Various Gases (The Standing Committee on Electrical Discharge of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 1970).
- [D7] J. DUTTON, F.M. HARRIS, H.J. JONES. — Departures from Paschen's Law for Sulphur Hexafluoride (*Proc. IEE*, Vol. 118, n° 5, 1971, pp. 732-733).
- [D8] I.D. CHALMERS, D.J. TEDFORD. — Spark Breakdown in Sulphur Hexafluoride and Arcton 12 (*Proc. IEE*, Vol. 118, n° 12, 1971, pp. 1893-1894).
- [D9] Y. KAWAGUCHI, K. SAKATA, S. MENJU. — Dielectric Breakdown of Sulphur Hexafluoride in Nearly Uniform Fields (*IEEE Trans. PAS*, Vol. 90, n° 3, 1971, pp. 1072-1078).
- [D10] G. OPPERMAN. — Die Paschen-Kurve und die Gültigkeit des Paschen-Gesetzes für Schwefelhexafluorid (Internationales Symposium Hochspannungstechnik, München, 1972, pp. 378-385).
- [D11] P. HASSE. — Die Entwicklung des elektrischen Durchschlags im homogenen Feld in SF₆ im Vergleich mit Luft (Dissertation, Technische Universität Berlin, 1972).

- [D12] H. MOISSAN, P. LEBEAU. — Sur un nouveau corps gazeux : le Perfluorure de soufre SF₆ (Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Tome 130, 1900, S. 865-871).
- [D13] H.C. POLLOCK, F.S. COOPER. — The Effect of Pressure on the Positive Point-to-Plane Discharge in N₂, O₂, CO₂, SO₂, SF₆, CCl₄, F₂, A, He, and H₂ (*Phys. Rev.*, Vol. 56, 1939, S. 170-175).
- [D14] G. CAMILLI, G.S. GORDON, R.E. PLUMP. — Gaseous Insulation for High-Voltage Transformers (*A.I.E.E. Trans.*, Part III, Vol. 71, 1952, S. 348-357).
- [D15] C.N. WORKS, T.W. DAKIN. — Dielectric Breakdown of Sulfur Hexafluoride in Nonuniform Fields (*A.I.E.E. Trans.*, Part I, Vol. 72, 1953, S. 682-689).
- [D16] W. BOECK, H. TROGER. — SF₆ Insulated Metalclad Switchgear for Ultra-High Voltages (UHV) (CIGRÉ 1972, 23-08).

E – COURBE DE PASCHEN POUR L'HYDROGENE

par

H. WINKELNKEMPER

En raison de ses caractéristiques particulières, l'hydrogène a acquis une importance considérable pour diverses applications dans la technique haute tension, bien que sa rigidité diélectrique soit seulement la moitié de celle de l'air. Il possède en effet une bonne conductibilité thermique et sa faible masse moléculaire lui permet de n'avoir que des pertes de charge négligeables en ventilation. Donc l'hydrogène convient par excellence pour être utilisé en tant que milieu gazeux de refroidissement et il est de fait choisi pour le refroidissement des turbogénérateurs. Suite aux travaux effectués par Felici [E6], l'hydrogène est également utilisé comme milieu isolant dans les générateurs électrostatiques du type Van de Graaf, principalement dans les modèles à disques et à tambours.

Quand on utilise l'hydrogène, on doit prêter spécialement attention au risque d'explosion puisque l'hydrogène mêlé à l'oxygène forme le mélange détonant bien connu qui explose dès qu'il est mis au contact d'une étincelle. A l'état pur, l'hydrogène est totalement inoffensif. Dans le cas d'un mélange hydrogène-air, il y a un risque d'explosion si la teneur en hydrogène est comprise entre 6 et 67 % en volume [E16]. Pour des raisons de sécurité, ces limites sont un peu plus espacées. La teneur en hydrogène de l'air doit être moins de 4 % ou plus de 75,6 % en volume, si on veut être sûr que tout risque d'explosion soit exclu.

Paschen [E1] en 1889 et de la Rue et Müller [E2] en 1880 ont fait des publications sur la rigidité diélectrique de H₂. Beaucoup d'autres ont suivi. Dans son livre intitulé "Elektrische Durchbruchfeld stärke von Gasen" [E18], paru en 1923, Schumann a réuni des résultats, disponibles à l'époque, d'essais effectués sur divers gaz, parmi lesquels l'hydrogène. On peut trouver dans un ouvrage de Gänger [E15] des compilations similaires de résultats publiés jusqu'au début de 1950. Toutefois, pour ce qui concerne la présente publication, on a retenu les articles originaux plutôt que les exposés ou rapports résumés pour définir la courbe principale dans le diagramme de Paschen.

En fait, treize publications [E1] à [E12] et [E14] ont été choisies dans la littérature dans ce but, sur la

E – PASCHEN CURVE FOR HYDROGEN

by

H. WINKELNKEMPER

Because of its special characteristics, hydrogen has gained considerable importance for various applications in high-voltage engineering although its dielectric strength is only about half of that of air. Its thermal conductivity is good and its ventilation losses are particularly low because of its small mole mass. Hydrogen is therefore eminently suitable for use as a gaseous cooling medium and is in fact preferred as a means of cooling turbogenerators. Following the analyses carried out by Felici [E6], pure hydrogen is also used to advantage as an insulant for high-voltage electrostatic generators of the van-de Graaff type, mainly in the disc and drum models.

When using H₂ special attention has to be paid to the risk of explosion since hydrogen mixed with oxygen forms the well-known oxyhydrogen gas which will explode if brought into contact with a spark. In its pure state, H₂ is completely harmless. As regards a hydrogen-and-air mixture, there is a risk of explosion if the H₂ content is anywhere between 6 and 67 % by volume [E16]. From the point of view of safety, the limits are spaced even further apart. The hydrogen content of air must be less than 4 %, or more than 75,6 % by volume, if the risk of explosion is to be safely excluded.

Papers dealing with the dielectric strength of H₂ were prepared by Paschen [E1] in 1889 and by de la Rue and Müller [E2] in 1880. Many others have followed. In his book entitled "Elektrische durchbruchfeld stärke von Gasen" [E18], which appeared in 1923, Schumann listed the results – available at the time – of breakdown tests for various gases, including H₂. Similar compilations based on results published until the beginning of the 1950s, are found in a book by Gänger [E15]. As far as this paper is concerned, however, the original publications rather than summarizing descriptions or reviews were used for the purpose of determining the master curve in the Paschen diagram.

In fact, 13 papers [E1] to [E12] and [E14] were chosen from the literature for this purpose, on the basis

Tableau E1 — Table E1
Conditions d'essais relatives aux références pour l'hydrogène
Details of breakdown tests of references for hydrogen

Reference n°	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	
Symbol on graph Symbole sur graphique	▲	■	●	▼	◇	□	V	▽	○	Λ	+	△	×	⊗	
Type	spheres	planes	planes	planes	• •	planes	planes	planes	planes	planes	spheres	planes	planes	planes and* et	
Nature	brass laitan		platin platine	brass laitan	steel acier	steel acier	• • •	steel acier	tungsten tungstène	platin platine	brass laitan	iron fer	V2A steel acier V2A	polished polies and 60 et	75
Finish Fin															
Diameter — Diamètre	20 mm	38 mm	36 mm	135 mm	• •	37,5 mm	40 mm	42 mm	70 mm		25 mm	85 mm	90 and 60 et	75	
Edge radius Coins arrondis		75 mm	curved courbes	R				rounded arrondies	R	R		R	R	R	
Temperature of test °C Température pendant l'essai	20	-----	22	20	room- ambiante	-----	-----	---	---	room ambiante	18	20-22	23-26	---	
Applied voltage Nature de la tension appliquée	d.c. continue	d.c. continue	1/2 wave 1/2 onde	50 Hz	50 Hz	d.c. continue	d.c. continue	d.c. continue	d.c. continue	d.c. continue	d.c. continue	d.c. continue	d.c./a.c. continue alternative	d.c. continue	
Pressure range Pressions	0,0267 1,013	0,0205 1,013	0,00067 0,76	1,013 20,26	0,008 2,38	5,07 70,9	0,00133 0,0267	0,00133 0,693	0,987 25,3	0,0467 - 0,15 - 0,6	0,0053 0,1	0,0018 0,0837	0,02 - 10	0,0026 0,427	
Spacing — Distance	mm	1 - 8	5,88	5,5 - 8	1 - 20	2 and et 4	3,96	3 - 12	3,5	2 and et 5	5	0,5 - 6	1 - 35	0,75 - 18	1 - 25
Range of p.d. Variations de p.d.	bar.mm	0,0267 5,0	0,133 5,6	0,021 3,77	12,66 275	0,016 95	24,1 285	0,0108 0,172	0,0107 2,67	4,930 126,3	0,08 5,7	0,0667 6	0,0187 2,53	0,015 180	0,0266 1,33

- Convex discs — Disques convexes
- • One sphere 25 mm ϕ and one plate disc 60 mm ϕ — Une sphère 25 mm ϕ et un disque plan 60 mm ϕ
- • • Anode: silvered quartz plate
Cathode: zinc — Anode: plateau en quartz argenté
Cathode: zinc
- R Rogowski profile — Profil de Rogowski
- * Special electrodes for measurements below the minimum — Electrodes spéciales pour les mesures au-dessous du minimum

base d'une comparaison critique. Certaines parmi les plus anciennes [E1], [E2], [E7], [E11] non seulement ont une valeur historique mais sont à prendre en considération également pour déterminer l'écart probable de la courbe de Paschen avec les résultats actuels. Cependant, comme toutes les publications antérieures ne concernent qu'une partie relativement réduite de la courbe de Paschen, la courbe de l'hydrogène a été déterminée à nouveau à l'Institut des hautes tensions de l'Université de Berlin, dans le domaine couvert par le produit pression-distance entre les électrodes, du minimum de Paschen jusqu'à 180 bar.mm [E13].

Les résultats de ce travail sont presque parfaitement en accord, dans tout le domaine étudié, avec la courbe de Paschen probable tracée à partir des valeurs données dans les treize publications retenues. Les valeurs prises dans [E9] pour un espace de 5 mm entre les électrodes concordent aussi presque exactement avec cette courbe, tandis que les valeurs obtenues pour une distance de 2 mm sont légèrement plus faibles. Pour [E6], il y a presque complet accord dans le domaine couvert par p.d. jusqu'à 65 bar.mm environ, alors que pour les valeurs plus élevées de ce produit, on commence à observer une déviation de la courbe.

Le tracé de la courbe de Paschen en échelle linéaire (Fig. E2) met très clairement en évidence les déviations à la loi de Paschen. Ces déviations sont observables pour un écartement de 4 mm entre électrodes avec les résultats de [E6] et pour un écartement de 2 mm avec les résultats de [E9]. Le champ électrique pour lequel on commence à les observer, alors que le produit $p \times d$ augmente, est d'environ 200 kV/cm dans les 2 cas. Cette valeur est la même que celle obtenue par Oppermann [E20] pour l'air, le SF₆ et l'argon.

of a critical comparison. Some of the very old ones [E1], [E2], [E7], [E11] not only have historical significance but should also be taken into consideration when determining the probable variation of the Paschen curve as compared to the actual readings. However, since all previous papers deal only with a relatively small section of the Paschen curve, the corresponding H₂ curve has been measured again — in the High-Voltage Institute of the Berlin Technical University — over the pressure spacing product range, from the Paschen minimum up to 180 bar.mm, [E13].

The results of this paper agree almost entirely, over the whole range investigated, with the probable Paschen curve as plotted from the values given in the 13 papers selected. The values taken from [E9] for a spacing of 5 mm also agree almost exactly with this curve, whereas the values for the 2 mm gap are slightly lower. For [E6], there is practically full agreement in the pd range up to about 65 bar.mm, whereas at higher values of this product departure from the curve commences.

The Paschen curve plotted in the linear scale (fig. E2) indicates the departures from the Paschen's law quite clearly. The deviating curves are shown for the 4 mm spacing using the values taken from [E6], and for the 2 mm spacing by reference to [E9]. The electric field strength at which departure begins to show as the product p.d. increases is about 200 kV/cm in both cases. This value is the same as that obtained by Oppermann [E20] for air, SF₆ and argon.

Tableau E2 – Table E2
 Breakdown voltages of hydrogen in uniform field
Tensions disruptives de l'hydrogène dans un champ uniforme
 Values of the Paschen curve (Fig. E1)
Valeurs relevées sur la courbe de Paschen (Fig. E1)
 Temperature 25°C

Produit pression distance <i>Pressure Spacing</i> <i>Product</i> bar.mm	Tension disruptive, valeur de crête <i>Breakdown</i> <i>Voltage, crest</i> kV	Produit pression distance <i>Pressure Spacing</i> <i>Product</i> bar.mm	Tension disruptive valeur de crête <i>Breakdown</i> <i>Voltage, crest</i> kV
$2,7 \cdot 10^{-3}$	10,000	1	2,6
$4,0 \cdot 10^{-3}$	1,800	2	4,3
$5,0 \cdot 10^{-3}$	0,970	3	6,0
$6,0 \cdot 10^{-3}$	0,640	4	7,5
$8,0 \cdot 10^{-3}$	0,400	5	8,9
$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,320	6	10,2
$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,300	8	11,5
$1,4 \cdot 10^{-2}$	0,290 *	10	15,8
$2,0 \cdot 10^{-2}$	0,295	20	28
$3,0 \cdot 10^{-2}$	0,325	30	40
$4,0 \cdot 10^{-2}$	0,370	40	52
$5,0 \cdot 10^{-2}$	0,400	50	63
$6,0 \cdot 10^{-2}$	0,440	60	74
$8,0 \cdot 10^{-2}$	0,500	80	98
$1,0 \cdot 10^{-1}$	0,580	100	120
$2,0 \cdot 10^{-1}$	0,880	120	140
$3,0 \cdot 10^{-1}$	1,050	160	182
$4,0 \cdot 10^{-1}$	1,380	200	225
$5,0 \cdot 10^{-1}$	1,600		
$6,0 \cdot 10^{-1}$	1,820		
$8,0 \cdot 10^{-1}$	2,200		

* Paschen minimum.

Remarques sur les références relatives à la courbe de Paschen de H₂

[E1] Paschen (1889)

Cette publication a surtout une importante historique. En dépit des techniques expérimentales utilisées à cette époque, des résultats ont été obtenus qui dans les valeurs élevées, c'est-à-dire pour des valeurs de p.d. supérieures à 1 bar.mm, sont très voisins de la courbe choisie. Au-dessous de ce niveau de 1 bar.mm, les valeurs sont au-dessus de la courbe d'environ 40 %. Ces déviations considérables sont probablement dues à des impuretés dans le gaz dont la présence serait principalement provoquée par des techniques de mise sous vide inadéquates.

[E2] De la Rue et Müller (1880)

Ces valeurs sont les seules qui n'ont pu être prises dans la publication originale. Celles qui sont données

Notes on references to the H₂ Paschen curve

[E1] Paschen (1889)

This paper has mainly historical significance. In spite of the testing technique used at that time, results were obtained which in the upper range, i.e. at p.d. values over 1 bar.mm, closely approximate the curve chosen. Below the level of 1 bar.mm, the values lie above the curve by up to 40 %. These considerable departures are probably due to impurities in the gas, mainly as a result of inadequate evacuation techniques.

[E2] De la Rue and Müller (1880)

These values are the only ones which could not be taken from the original paper and those in [E21] had to

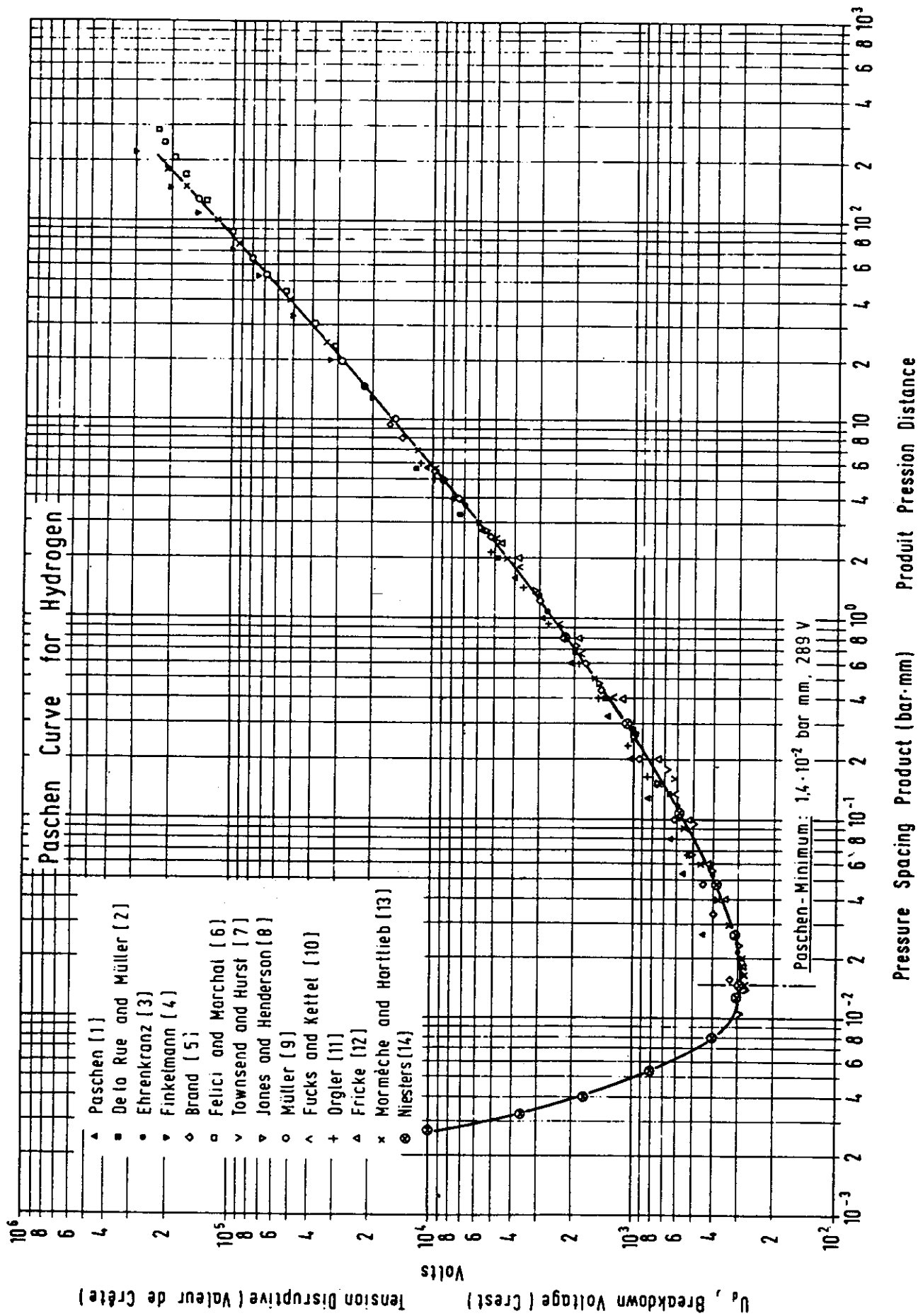


Figure E1 - Courbe de Paschen pour l'hydrogène en échelles logarithmiques. Température 25°C.
Paschen curve for hydrogen in log log scale. Temperature 25°C.

dans [E21] ont dû être utilisées à la place. Ce qui a été dit pour [E1] s'applique ici également.

[E3] Ehrenkranz (1939)

Ici encore, il y a un accord étroit avec la courbe au-dessus de 1 bar.mm. Les déviations mineures dans le domaine des faibles valeurs peuvent être attribuées aux impuretés dans le gaz. La spectrographie a mis en évidence la présence de traces de N_2 , OH et CO. Les valeurs données dans cette publication sont en accord dans une large mesure avec celles données dans [E21] qui ne sont pas par conséquent retenues ici.

[E4] Finkelmann (1937)

Cette publication couvre un domaine compris entre 12 et 220 bar.mm. Les valeurs sont beaucoup plus élevées que celles données dans [E6] et [E9] sur toute l'étendue du domaine. La description de la technique d'essai ne montre pas que des erreurs aient pu être faites. Dans [E9], Müller traite de cet écart d'une façon très détaillée et arrive à la conclusion que les valeurs obtenues par Finkelmann sont trop élevées.

[E5] Brand (1972)

Dans le cas où il y a rupture diélectrique au-dessous de 1-kV, des lectures de tension rendues incorrectes par la présence d'harmoniques expliquent les déviations observées dans le domaine des plus faibles valeurs. Les valeurs plus élevées concordent totalement avec la courbe.

[E6] Felici et Marchal (1948)

Cette publication traite de la rigidité diélectrique des gaz comprimés, y compris l'hydrogène. Les essais diélectriques sur H_2 ont été effectués en faisant varier le produit p.d. entre 24 et 285 bar.mm avec des électrodes en différents matériaux et pour un espacement de 4 mm environ. A titre de comparaison avec [E13], les résultats obtenus avec des électrodes en acier inoxydable ont été portés sur la figure E1. La limite de validité de la loi de Paschen se situe à 65 bar.mm environ. On peut observer qu'à partir de ce point, la courbe de la tension disruptive s'écarte de la courbe de Paschen vers le bas (voir figure E2).

[E7] Townsend et Hurst (1903-04)

Le fait que les valeurs au voisinage du minimum de Paschen concordent bien avec les valeurs prises dans [E13] et [E14] justifie le tracé de la courbe de Paschen tel qu'il est effectué dans ce domaine.

[E8] Jones et Henderson (1939)

Cette publication donne des résultats correspondant à la partie inférieure de la courbe de Paschen. Ces résultats diffèrent très légèrement seulement des valeurs relevées sur la courbe.

[E9] Müller (1966)

Des relevés ont été effectués pour deux espacements

be used instead. What was said under [E1] also applies here.

[E3] Ehrenkranz (1939)

Here again, there is close agreement with the curve above 1 bar.mm. The minor departures in the lower range can be attributed to impurities in the gas. The presence of N_2 , OH and CO traces was proved spectrographically. The readings recorded in this paper agree to a large extent with those in [E21], which are therefore not listed here.

[E4] Finkelmann (1937)

This paper covers the range between 12 and 220 bar.mm. The values are much higher than those in [E6] and [E9] over the whole range. The description of the testing techniques does not indicate that mistakes have been made. In [E9], Müller deals with these differing results in great details and arrives at the conclusion that the values obtained by Finkelmann are too high.

[E5] Brand (1972)

In the cases where breakdown occurred below 1 kV, reference is made to incorrect voltage readings due to harmonics to explain the departures in the lower range. The higher values are in close agreement with the curve.

[E6] Felici and Marchal (1948)

This paper deals with the dielectric strength of compressed gases, including H_2 . The dielectric tests on H_2 were made between 24 and 285 bar.mm with different electrode materials and a spacing of about 4 mm. By way of comparison with [E13], the readings taken with electrodes of stainless steel have been entered in fig. E1. The validity limit of Paschen's law is exceeded at about 25 bar.mm. From this point onwards, the breakdown voltage curve can be seen to depart from the Paschen curve in a downward direction (see fig. E2).

[E7] Townsend and Hurst (1903-1904)

The fact that the values near the Paschen minimum are in good agreement with those taken from [E13] and [E14] justifies the indicated Paschen curve in this range.

[E8] Jones and Henderson (1939)

This paper supplies readings for the lower part of the Paschen curve. The values differ only very slightly from those of the plotted curve.

[E9] Müller (1966)

Readings were taken for two different spacings. The

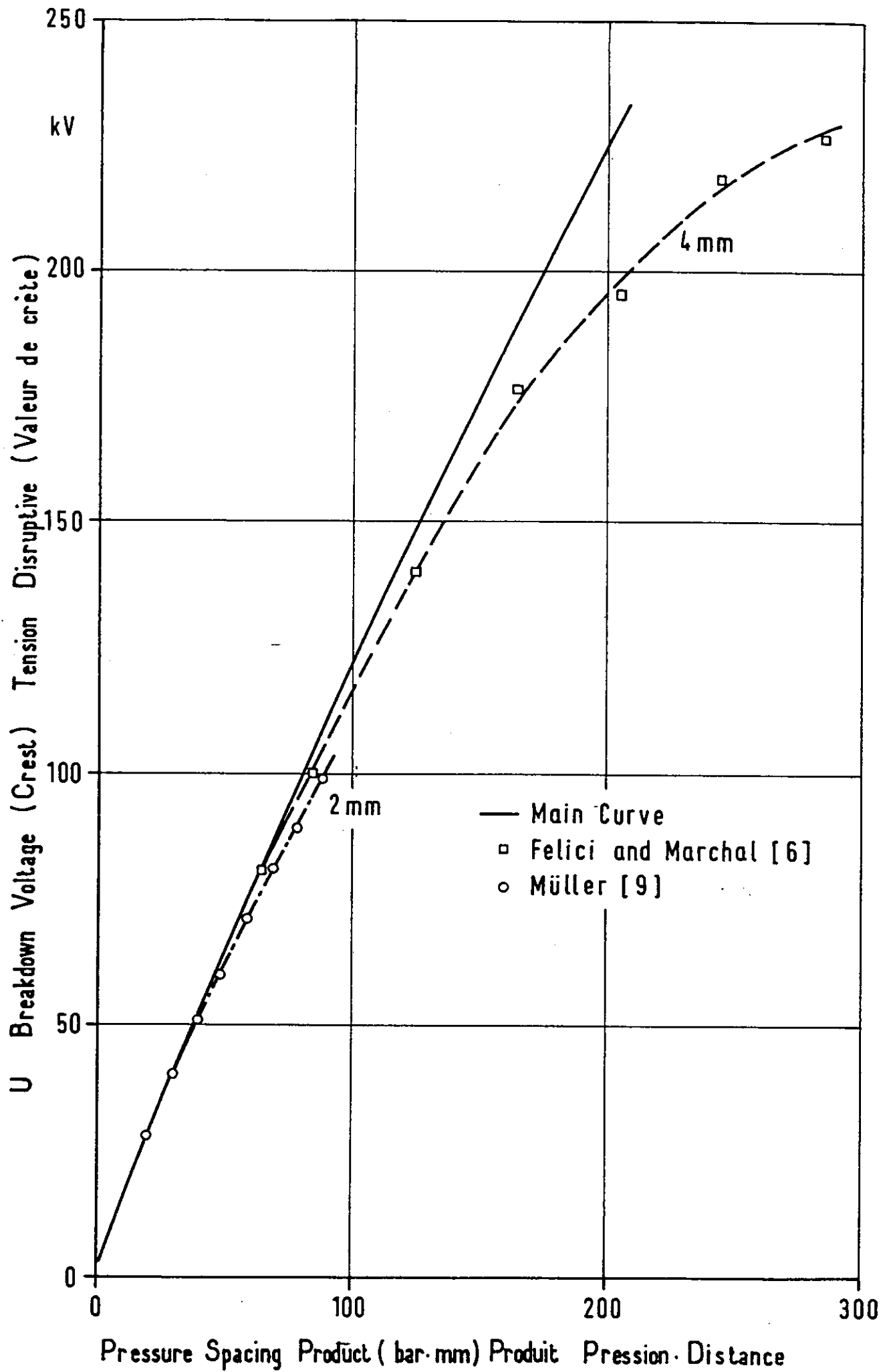


Figure E2 - Courbe de Paschen pour l'hydrogène en échelles linéaires. Température 25°C.
 Paschen curve for hydrogen in linear scale. Temperature 25°C.

entre électrodes différents. Le fait que les résultats concordent avec une tolérance meilleure que 0,3 % met en évidence la précision avec laquelle l'essai a été effectué. Seules les valeurs relevées pour un espacement de 5 mm sont portées sur la figure E1. Elles sont en bon accord avec les résultats pris dans [E13]. Les valeurs obtenues pour un espacement de 2 mm sont hors du domaine de validité de la loi de Paschen. Elles ont été portées sur le diagramme de Paschen, figure E2, où elles forment la branche déviée la plus basse.

[E10] Fuchs et Kettel (1940)

Les valeurs relevées sont situées dans la partie inférieure du diagramme, au voisinage de la courbe.

[E11] Orgler (1900)

Les valeurs relevées sont toutes un peu trop élevées. Ceci est dû probablement aux impuretés dans le gaz en raison de techniques de mise sous vide inadéquates (pompe à eau).

[E12] Fricke (1933)

Ces valeurs sont toutes légèrement trop faibles, sans doute parce que la cathode a été exposée à un rayonnement dur.

[E13] Mormeche et Hartlieb (1975)

Les travaux relatifs à cette publication couvrent presque tout l'ensemble du domaine porté sur la figure E1. Le produit $p.d$ a été obtenu, pour chaque point expérimental, en faisant varier les paramètres p et d de trois manières différentes, afin de contrôler la validité de la loi de Paschen. Les déterminations ont été effectuées en alternatif et en continu pour chaque point expérimental jusqu'à 8 kV. Les résultats étaient reproductibles et n'ont montré seulement que des écarts mineurs, difficilement mesurables entre les tensions disruptives obtenues en alternatif et en continu. Au-delà de 8 kV, les tensions disruptives ont été mesurées uniquement en alternatif. L'écart dans les valeurs relevées était moins de 0,2 % pour tout le domaine étudié, même pour des combinaisons extrêmement diverses des paramètres p et d .

Le minimum de Paschen a été obtenu en diminuant le produit $p.d$ par faibles échelons et en observant visuellement quand le trajet de la décharge passe de la surface plane des électrodes au bord à profil Rogowski. La tension minimale qui a été ainsi trouvée était égale à 276 V pour $p.d_{\min.} = 1,5.10^{-2}$ bar.mm, à la température de 25°C.

[E14] Niesters (1960)

Cette étude concerne un domaine où $p.d$ a des valeurs plus faibles, depuis 1 bar.mm jusqu'à $2,5.10^{-3}$ bar.mm environ, au-dessous du minimum de Paschen. Les recherches effectuées très soigneusement ont permis d'obtenir les données les plus sûres au voisinage et au-dessous du minimum de Paschen. Ces valeurs ont été utilisées pour le tracé de la courbe, figure E1. La tension minimale est 289 V pour $p.d_{\min.} = 1,4.10^{-2}$ bar.mm à 25°C. Cette valeur n'est que légèrement supérieure à la valeur minimale donnée dans [E13].

fact that they lie within a tolerance of less than 0.3 % indicates that the test was made very accurately. Only the readings for the 5 mm spacing have been entered in fig. E1. They are in close agreement with the results taken from [E13]. The values for a 2 mm spacing lie outside the validity range of Paschen's law. They have been entered in the Paschen diagram (fig. E2), where they form the lower departure branch.

[E10] Fuchs and Kettel (1940)

The readings lie in the lower part of the diagram, in the vicinity of the curve.

[E11] Orgler (1900)

These readings are a little too high over the whole range. This is probably due to impurities in the gas as a result of inadequate evacuation techniques (water jet pump).

[E12] Fricke (1933)

These values are slightly too low over the whole range, a fact which is probably due to the cathode having been exposed to hard radiation.

[E13] Mormeche and Hartlieb (1975)

This investigation covers nearly the whole range indicated in fig. E1. The product pd was formed for each measuring point by varying the factors p and d in three different combinations, each in order to check the validity of Paschen law. The measurements were carried out for each measuring point using a.c. and d.c. voltages up to 8 kV. The results were reproducible and showed only minor, hardly measurable differences between the a.c. and d.c. breakdown voltages. For readings above 8 kV only an a.c. voltage was used. The variation in the readings obtained was less than 0.2 % over the whole range investigated, even with extremely varied combinations of the factors p and d .

The Paschen minimum was obtained by decreasing the product pd in small steps and visual observation when the discharge path changed from the flat portion of the electrodes to the Rogowsky-profiled edge. The resulting minimum voltage was 276 V at $pd_{\min.} = 1.5 \times 10^{-2}$ bar.mm for the temperature of 25°C.

[E14] Niesters (1960)

This study is concerned with the lower pd range from approximately 1 bar.mm down to approximately 2.5×10^{-3} bar.mm, below the Paschen minimum. This very careful investigation provides the most reliable data for the range around and below the Paschen minimum. These values have been used for fig. E1. The minimum voltage is 289 V for $pd_{\min.} = 1.4 \times 10^{-2}$ bar.mm at 25°C. This value lies only slightly above the minimum value from [E13].

Références pour l'hydrogène — References for hydrogen

- [E1] Paschen F. — Wiedemanns Analen, Vol. 37 (1889) S. 69-96
 [E2] de la Rue, W. Müller K. — Phil. Trans. of the Royla Soc., Vol. 171 (1880) S. 83.
 [E3] Ehrenkranz F. — Phys. Rev. Vol. 55 (1939) S. 219-227.
 [E4] Finkelmann E. — Arch. f. Elektrot. Vol. 31 (1937) S. 282-286.
 [E5] Brand U. Untersuchungen im Hochspannungsinstitut der TU Braunschweig (1972)
 [E6] Felici N.J. Marchal Y. — Rev. Gén. ELect. Vol. 57 (1948) S. 155-162.
 [E7] Townsend J.S., Hurst — Phil. Mag. Vol. 8 (1904) S. 738-752 Vol. 6 (1903) S. 598-618.
 [E8] Jones F.L., Henderson J.P. — Phil. Mag. Vol. 28 (1939) S. 185-192.
 [E9] Müller E.K. — Zeitschr. f. angew. Physik Vol. 21 (1966) H. 3, S. 219-224.
 [E10] Fucks W., Kettel F. — Zeitschr. f. Physik, Vol. 116, (1940) S. 657-691.
 [E11] Orgler A. — Annalen der Physik, Vol. 4 (1900) H. 1 S. 159-174.
 [E12] Fricke H. — Zeitschr. f. Physik Vol. 174 (1933) S. 464-478
 [E13] Mormeche A., Hartlieb B. — Untersuchungen im Institut für Hochspannungstechnik und Starkstromanlagen der TU Berlin (1975).
 [E14] Niesters H. — Dissertation TH Aachen, Germany, 1960 and Proc. 4th Int. Conf. Ionisation Phenomena in gases, Uppsala 1960.
 [E15] Ganger B. Der elektrische Durchschlag von gasen Berlin 1953.
 [E16] Römp H. — Chemie Lexikon Bd. 2, Frankfurt/M. 1966.
 [E17] Townsend J.S. — Handbuch der Radiologie Bd. 1, Leipzig 1920.
 [E18] Schumann W.O. — Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen, Berlin 1923.
 [E19] Townsend J.S. Die Ionisation der Gase, Handbuch der Radiologie I, Leipzig 1920.
 [E20] Oppermann G. — Int. Symp. Hochspannungstechnik, München 1972, S. 378-385.
 [E21] Schöfer R. — Zeitschr. f. Physik, Vol. 110 (1938) S. 21-35.

F — COURBE DE PASCHEN POUR LE DIOXYDE DE CARBONE

par

Z. KRASUCKI*

Le dioxyde de carbone est un gaz inerte, obtenu facilement dans un état relativement pur. Il est utilisé comprimé, comme isolant dans les condensateurs haute tension, à faibles pertes.

La courbe de Paschen du gaz CO₂ est présentée figure F1. Cette figure montre que dans tout le domaine de variation du produit pression x écart entre les électrodes qui est considéré, les valeurs des tensions disruptives relevées dans les cinq références qui ont été retenues, se placent sur la même courbe, sans qu'aucune discontinuité n'apparaisse. Les matériaux et les géométries des électrodes sont donnés dans le tableau F1. Les coordonnées des points le long de la courbe tracée figure F1 sont données dans le tableau F2.

La variation de la tension disruptive du dioxyde de carbone en fonction du produit p.d, pression. distance entre les électrodes, est portée en échelles linéaires figure F2. Les courbes représentées en pointillé sur cette figure permettent d'estimer les déviations à la courbe de Paschen observées pour le dioxyde de carbone vers les hautes pressions.

* décédé

F — PASCHEN CURVE FOR CARBON DIOXIDE

by

Z. KRASUCKI*

Carbon dioxide is an inert gas, readily obtainable in a relatively pure state. Compressed carbon dioxide has been employed as insulation in high voltage low-loss capacitors.

The Paschen curve for CO₂ gas is presented in fig. F1. The figure shows that over the whole range of the pressure x spacing product considered, the values of the breakdown voltage from the five references used fall on the same curve, with no apparent discontinuities present. The electrode materials and geometries used are listed in table F1. The coordinates of points along the curve drawn in fig. F1 are given in table F2.

The dependence of breakdown voltage of carbon dioxide on the pressure x spacing product is plotted in linear scale in fig. F2. The dotted curves in the figure give an indication of the magnitude of departures from Paschen's law observed in carbon dioxide at high pressures.

* deceased.

Tableau F1 — Table F1
Conditions d'essais relatives aux références pour CO₂
Details of breakdown tests of references for CO₂

Reference n°		(F.1)	(F.2)	(F.3)	(F.4)	(F.5)
Symbol on graph Symbole sur graphique		○	△	□	▽	×
Electrodes	Type	planes = brass laiton	R	spheres steel acier	R	R
	Nature	—	Pt**	—	—	Cr***
	Finish — Fini	—	—	—	—	—
	Diameter—Diamètre	36 mm	150 mm	6,2 mm	135 mm	140 mm
	Edge radius Coins arrondis	—	R	3,1 mm	R	R
Temperature of test °C Température pendant l'essai		20	20	***	20	20
Applied voltage Nature de la tension appliq.		d.c. continu	d.c. continu	d.c. continu	50 Hz	d.c. continu
Pressure range Pressions bar		0,0001- -0,024	0,006- -0,83	***	1-20	1-40
Spacing Distance mm		1-10	8,4-34	0,1-0,44	1-20	0,5-20
Range of p × d Variations de p × d bar × mm		10 ⁻³ - -8,6 × 10 ⁻²	5 × 10 ⁻² - -17	***	10-190	1-80

- With gap enclosed by ebonite ring.
L'espace entre électrodes est enfermé dans un anneau en ébonite.
 - Plating — Revêtement.
 - Reference gives gas densities only. For 20°C and 0.25mm spacing, calculated pressure range was 10 to 51 bar and the p × d range was 2.6 to 12.7 bar × mm.
La référence donne seulement les masses volumiques du gaz. A 20°C et pour une distance de 0,25mm, la variation de pression calculée était de 10 à 51 bar et la variation de p × d de 2,6 à 12,7 bar × mm.
- R Rogowski.

Remarques sur les références relatives à la courbe de Paschen de CO₂

[F1] Carr

La courbe de Paschen montre, au voisinage du minimum, une certaine influence de la distance entre les électrodes. Les valeurs portées dans la figure F1 sont celles données par Carr pour des distances de 1 et 10 mm.

[F2] Bhalla et Craggs

Cette référence s'intéresse principalement aux mesures des coefficients d'ionisation et d'attachement dans le CO₂. Elle contient cependant un tableau donnant les distances pour lesquelles il y a disruption pour plusieurs valeurs de E/p, à partir desquelles les tensions disruptives ont été calculées.

[F3] Young

Les résultats présentés dans cette référence sont donnés sous forme de variations de la tension disruptive en fonction de la masse volumique du gaz pour diffé-

Notes on references to the CO₂ Paschen curve

[F1] Carr

In the neighbourhood of its minimum the Paschen curve exhibits some dependence on electrode separation. Values plotted in fig. F1 are those reported by Carr for electrode spacings of 1 mm and 10 mm.

[F2] Bhalla and Craggs

The reference is concerned mainly with measurements of ionization and attachment coefficients in CO₂. It contains, however, a table of breakdown sparking distances for various values of E/p whence the breakdown voltages were calculated.

[F3] Young

The results presented in the reference are in the form of dependences of breakdown voltage on gas density for different electrode separations. For the purpose

Tableau F2 - Table F2

Tensions disruptives du dioxyde de carbone dans un champ uniforme
 Température 20°C - Valeurs relevées sur la courbe de Paschen (Fig. F1)
Breakdown voltages of carbon dioxide in uniform field
Temperature 20°C. Values of the Paschen curve (Fig. F1)

Produit pression distance <i>Pressure Spacing</i> <i>Product Bar xmm</i>	Tension disruptive Valeur de crête <i>Breakdown</i> <i>Voltage, Crest kV</i>	Produit pression distance <i>Pressure Spacing</i> <i>Product Bar xmm</i>	Tension disruptive Valeur de crête <i>Breakdown</i> <i>Voltage, Crest kV</i>
3 x 10 ⁻³	0.50	0.50	2.8
4 x 10 ⁻³	0.44	1.0	4.6
5 x 10 ⁻³	0.41	1.5	6.2
6 x 10 ⁻³	0.41	2	7.8
8 x 10 ⁻³	0.42	3	10.5
1 x 10 ⁻²	0.44	4	13.0
2 x 10 ⁻²	0.53	5	15.5
3 x 10 ⁻²	0.61	6	18.0
4 x 10 ⁻²	0.69	8	23.5
5 x 10 ⁻²	0.77	10	28
6 x 10 ⁻²	0.84	15	40
8 x 10 ⁻²	0.97	20	51
1 x 10 ⁻¹	1.08	30	71
		40	90
		50	110
		60	130
		80	170
		100	205
		150	300

rents écartements entre électrodes. Pour exprimer les données de Young sous la forme d'une variation de la tension disruptive en fonction du produit pression x écart entre les électrodes, on a utilisé l'équation d'état de Beattie-Bridgmann :

of expressing Young's data as a dependence of breakdown voltage on the pressure x spacing product, use was made of the Beattie-Bridgman equation of state :

$$P = \frac{RT(1 - \Sigma)}{V^2} (V + B) - \frac{A}{V^2}$$

où :

where : $A = A_0 \left(1 - \frac{a}{V}\right)$

$$B = B_0 \left(1 - \frac{b}{V}\right)$$

et :

and :

$$\Sigma = \frac{C}{VT^3}$$

avec P exprimé en atmosphères, V exprimé en cm³/g, T exprimé en K. Les valeurs des constantes pour CO₂ étaient :

with P given in atmospheres, V in cm³/g, T in degrees K. The values of the constants taken for CO₂ were :

$$R = 0,865$$

$$B_0 = 2,381$$

$$\Sigma = 1,6443$$

$$A_0 = 2586$$

$$a = 1,621$$

$$C = 15.10^6$$

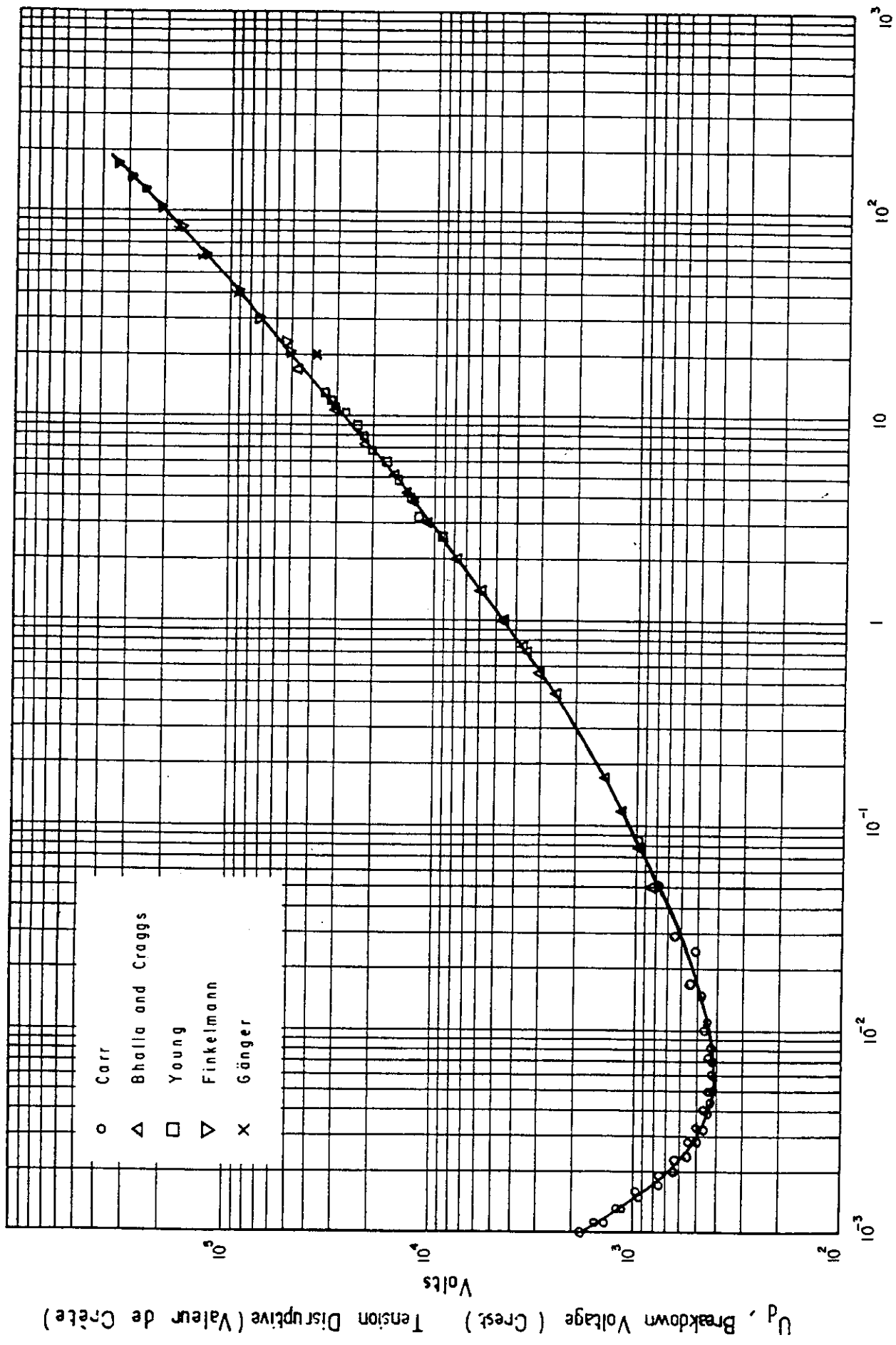


Figure F1 - Courbe de Paschen pour le dioxyde de carbone en échelles logarithmiques. Température 29°C.
 Paschen curve for carbon dioxide in log log scale. Temperature 29°C.

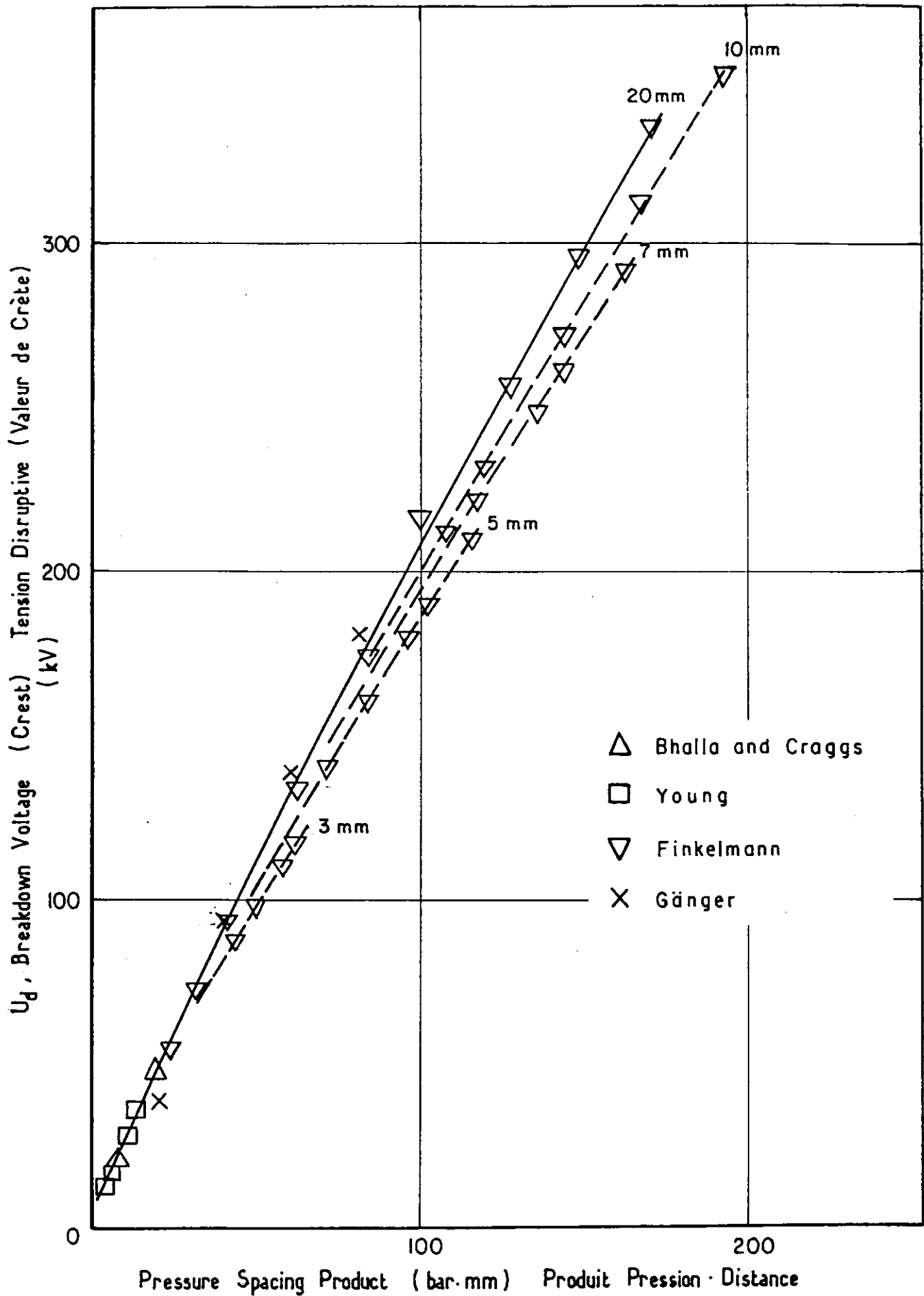


Figure F2 - Courbe de Paschen pour le dioxyde de carbone en échelles linéaires. Température 20°C.
 Paschen curve for carbon dioxide in linear scale. Temperature 20°C.

Les valeurs reportées dans la figure F1 sont celles données par Young pour un écartement entre électrodes de 0,25 mm.

[F4] Finkelmann

Sur la figure F1 sont seulement reportés les résultats donnés dans la référence pour un écartement entre électrodes de 20 mm. Les données pour des écartements jusqu'à 3 mm sont portées figure F2.

Values included in fig. F1 were those reported by Young for the electrode spacing of 0.25 mm.

[F4] Finkelmann

In fig. F1 are included only the results reported in the reference for the electrode spacing of 20 mm. The data for spacings down to 3 mm are plotted in fig. F2.

Références pour le dioxyde de carbone — References for Carbon Dioxide

- [F1] W.R. Carr — Phil. Trans. Roy. Soc. A 201, 403 (1903)
- [F2] M.S. Bhalla and J.D. Craggs — Proc. Phys. Soc. 76, 369. (1960)
- [F3] D.R. Young — J. Appl. Phys., 21, 222 (1950)
- [F4] E. Finkelmann — Arch. Elektrotech. 31, 282 (1937)
- [F5] B. Ganger. — Arch. Elektrotech. 34, 633 (1940)

G — COURBE DE PASCHEN POUR L'HELIUM

par

J. GERHOLD et T.W. DAKIN

Dans le tableau de classification périodique des éléments, l'hélium suit immédiatement l'hydrogène, ayant une masse atomique de 4,003. Son point d'ébullition (4,21 K ou $-269,79^{\circ}\text{C}$) est le plus faible de tous les éléments. Sa température critique est 5,2 K et sa pression critique 2,33 bar. Chimiquement, c'est un gaz complètement inerte ; il ne forme aucun composé stable ou ne fait l'objet d'aucune réaction chimique, dans des conditions normales.

En raison de son très faible point d'ébullition, il permet d'atteindre des températures très basses, voisines du zéro absolu et rend possible les études scientifiques de phénomènes se produisant à ces basses températures, qui ont conduit à la découverte de la supraconductivité. Des travaux de développement technologique sont menés maintenant en beaucoup d'endroits en vue d'utiliser les supraconducteurs dans le matériel électrique. Des câbles d'énergie et des machines tournantes supraconducteurs, actuellement en cours de réalisation, promettent une réduction notable, à puissance égale, des dimensions du matériel.

L'hélium liquide est un fluide de faible conductivité, assez isolant. L'hélium gaz a, à la température ambiante, une rigidité diélectrique faible, environ le douzième de celle de l'air à la pression atmosphérique. Mais à son point d'ébullition à la pression de 1 atmosphère, l'hélium gaz est assez dense pour que sa rigidité diélectrique soit 3,3 fois celle de l'air à la température ambiante et à la même pression. Une augmentation de la masse volumique du gaz à 4,21 K est due à la contraction naturelle du gaz quand la température diminue. Au point d'ébullition, 4,21 K, la masse volumique de l'hélium est 0,0167

G — PASCHEN CURVE FOR HELIUM

by

J. GERHOLD and T.W. DAKIN

Helium is the next atom above hydrogen in the Periodic Table, having an atomic weight of 4.003. Its boiling point (4.21 K or -269.79°C) is the lowest of all elements. Its critical temperature is 5.2 K and its critical pressure is 2.33 bar. Chemically, it is essentially inert, and does not form any stable compounds or undergo normal chemical reactions.

Because of its very low boiling point, it has led to the attainment of very low temperatures, close to absolute zero, and has made possible scientific studies of phenomena at these low temperatures, which led to the discovery of superconductivity. Engineering development work is now underway in many places to make practical electric power apparatus with superconducting conductors. Superconducting power cables and rotating machines have been achieved, which promise a significant reduction in size of apparatus for the same power.

Liquid helium is a fair insulating fluid of low conductivity. Gaseous helium has, at room temperature, a low dielectric strength, about 1/12 the dielectric strength of air at atmospheric pressure. But at its boiling point at one atmosphere pressure, helium gas is sufficiently dense to have a dielectric strength about 3.3 times that of air at room temperature at the same pressure. The increased density of helium gas at 4.21 K is due to the usual contraction of gas with decreasing temperature. At its boiling point, 4.21 K, helium gas density is 0.0167 g/cm³, compared to air at 1 atmosphere pressure at 20°C

Tableau G1 – Table G1
Conditions d'essais relatives aux références pour l'hélium
Experimental conditions for helium breakdown test

Reference	[G1] Townsend (Gill-Pidduk)	[G2] Levi	[G3] McCallerm Klatzow	[G4] Kusko	[G5] Bartnik	[G6] Comsa Cohen	[G7] Schenhuber	[G8] Brand	[G9] Fallou et al	[G10] Gerhold	[G11] Thoris et al	[G12] Meats	
Symbol on graph Symbole sur graphique	Δ	○	▽	◇	⬆	□	—	▷	●	●		⊠	
Electrodes	Type		spheres	spheres	planes		spheres	planes	sphere plan	sphere plan		sphere plan	
	Nature								acier steel		Nb, acier Cu, steel	cuivre copper	Nb, brass laiton
	Finish Fini										polished polies		
	Diameter Diamètre			35 mm	203,2mm		5,55 mm		25 mm	15 mm		100 mm	60 mm
	Edge radius Coins arrondi				R								
Temperature of test Température pendant l'essai	~20°C	~20°C	~20°C	~25°C		~20°C	~20°C	20°C	4,4-20K	4,5-30K	6-200K	4,2-10K	
Applied voltage Nature de la tension appliquée	a. c. alternative	d. c. continue	d. c. continue		d. c. continue				50 Hz (2kV/s)	d. c. continue (0,3kV/s)	50 Hz (1kV/s)	d. c. continue (0,5kV/s)	
Pressure range Pressions	bar	0,0026 0,0068	0,005 0,1	0,01 0,03	15 85		18 150	0,00033 0,0033	0,04 2,01	~1	1-3,5	1-10	1-10
Spacing Distance	mm	7,1 to d 8,4	~5	3-8	3,18 12,7 22,2		0,152	10 20	1-6		0,3 -5	5-60	0,5-3
Comments — Observations	(1)	(2)	(1)		(3)		(4)		(5)		(5)	(6)	

- | | |
|---|---|
| <p>(1) Tests near Paschen minimum only.</p> <p>(2) Tests near Paschen minimum to about 280V.</p> <p>(3) Data only near Paschen minimum to 1900V.</p> <p>(4) Tests below and near Paschen minimum.</p> <p>(5) Low temperature references.</p> <p>(6) Tests to 47 kV/mm stress, often spark conditioning.</p> | <p>— Essais au voisinage du minimum de Paschen seulement.</p> <p>— Essais au voisinage du minimum de Paschen jusqu'à 280V</p> <p>— Essais au voisinage du minimum de Paschen jusqu'à 1900V</p> <p>— Essais au voisinage et au-dessous du minimum de Paschen.</p> <p>— Référence à basse température.</p> <p>— Essais jusqu'à 47kV/mm. Souvent conditionnement par étincelles.</p> |
|---|---|

g/cm^3 , à comparer à celle de l'air qui est $0,0012 \text{ g/cm}^3$ à la pression de 1 atmosphère et à 20°C . Ainsi, du fait de sa masse volumique élevée, l'hélium gaz a une rigidité diélectrique relativement intéressante aux températures où les supraconducteurs sont utilisés, c'est-à-dire 4.10 K.

Les premières mesures de la rigidité diélectrique de l'hélium remontent au début du 20ème siècle. Gill et Pidduk ont été probablement les premiers à effectuer des mesures soigneusement sur de l'hélium purifié, qui sont mentionnées dans l'ouvrage classique de Townsend sur l'électricité dans les gaz, publié en 1915. Ces mesures étaient limitées aux faibles tensions et aux basses pressions, dans la région voisine du minimum de Paschen.

En raison de la faible rigidité diélectrique de l'hélium à la température ambiante, les valeurs expérimentales sont sensibles aux impuretés gazeuses ayant une rigidité plus élevée. Par exemple Townsend note que le minimum de Paschen trouvé égal à 156 volts par Gill et Pidduk augmente jusqu'à 187 volts en présence de 0,75 % d'air seulement. L'influence des impuretés sur la rigidité diélectrique est probablement responsable de la dispersion plutôt importante observée dans les valeurs de rigidité diélectrique qui ont été publiées.

La rigidité diélectrique de l'hélium gaz aux basses températures présente un grand intérêt technique pour l'isolation des supraconducteurs. Aussi les mesures faites récemment aux faibles températures sont prises en compte dans cette étude. On peut estimer, selon la théorie, que les valeurs de la tension disruptive à ces basses températures se placent sur la même courbe

with a density of 0.0012 g/cm^3 . Thus, due to its high density, helium gas has a fairly useful dielectric strength at the temperatures where superconductors will be operated : 4-10 K.

Measurements of helium dielectric strength date back to the beginning of the 20th century. Probably the first careful measurements of purified helium were made by Gill and Pidduck and summarized in Townsend's classical book on Electricity in Gases, published in 1915. Those measurements were limited to low voltage and pressures in the region near the Paschen minimum.

Because of the low dielectric strength of helium at room temperature, the test values are quite sensitive to impurity gases having higher strength. For example, Townsend notes that at the Paschen minimum, which Gill and Pidduck found to be 156 volts, an impurity of only 0.75 % air increased the value to 187 volts. This sensitivity of the strength to impurities is probably responsible for the rather wide scatter in published dielectric strength values.

Because there is great technical interest in the low temperature dielectric strength of helium gas for insulation of superconductors, the recent low temperature measurements are included in this survey. It was thought on a theoretical basis that the low temperature breakdown voltage values should fall on the same Paschen curve (vs. the pressure-spacing product) as the room

de Paschen (en fonction du produit pression-écart entre les électrodes), que celles mesurées à la température ambiante, si on transforme les données en fonction du produit masse volumique du gaz-écart entre les électrodes. Aux basses températures, près du zéro absolu, où la masse volumique du gaz est élevée, l'hélium n'obéit pas aux simples lois des gaz. Les tables donnant la masse volumique de l'hélium gaz en fonction de la pression et de la température, admises le plus couramment, sont celles de D.B. Mann [G13]. D'après la théorie de la rupture diélectrique des gaz basée sur le processus d'une avalanche électronique, il n'y aurait, en champ uniforme, pas, ou peu, d'effet de la température sur le processus, excepté le fait que la température affecte la masse volumique du gaz.

Les tensions disruptives, mesurées aussi bien à la température ambiante, 20°C, qu'aux températures cryogéniques, sont portées ensemble dans la figure G1, en fonction du produit bar.mm pour les valeurs mesurées à 20°C et du produit (g/cm³).mm pour les valeurs mesurées à 20°C et aux basses températures. Compte tenu de la dispersion des résultats, il ne paraît pas exister un écart de la tension disruptive dû à la température, pour une même valeur du produit masse volumique-écart entre les électrodes. L'échelle bar.mm est déplacée par rapport à l'échelle (g/cm³).mm d'un facteur égal au rapport de la pression (bars) de l'hélium à sa masse volumique μ à la température considérée. A 20°C et pour une pression de l'hélium égale à 1 bar,

$$\mu(\text{g/cm}^3) = \left(\frac{4,003}{22,41.10^3} \right) \left(\frac{273}{293} \right) / 1,0133$$

$$\mu(\text{g/cm}^3) = 1,642.10^{-4}$$

Le facteur 1,0133 permet de transformer la pression donnée en atmosphère, en bars.

Remarques sur les références relatives à la courbe de Paschen de l'hélium

Les références [G1], [G2], [G3] et [G5] présentent des données pour les faibles tensions seulement au voisinage du minimum de Paschen, mais elles concernent apparemment, dans la plupart des cas, de l'hélium soigneusement purifié. On note une bonne concordance entre les tensions disruptives au minimum de Paschen, trouvées dans les références [G1], [G2] et [G5] :

[G1] Gill et Pidduck	: 156 volts
[G2] Levi	: 160-170 volts
[G5] Bortnik	: 160 volts

Mc Callum et Klatzow [G3] donnent pour le minimum une valeur plus élevée, 240 volts environ.

Bortnik [G5] fait des essais jusqu'à des tensions un peu plus élevées (1900 volts). Il présente également un calcul théorique approfondi de la courbe de Paschen pour les faibles pressions, au voisinage du minimum ; la théorie paraît concorder avec ses résultats expérimentaux qui sont plus élevés que les autres valeurs réunies, au-dessus du minimum de Paschen. Bortnik a également quelques données intéressantes concernant la rupture diélectrique en champ non uniforme.

temperature measurement, if the data were converted to a gas density-spacing product. At low temperatures, near absolute zero, where the helium gas density is high, helium does not follow the simple gas laws. The most widely accepted tables for the helium gas density as a function of pressure and temperature are those of D.B. Mann [G13]. The theory of gas breakdown as an electron avalanche process indicates that there should be, in a uniform field, no, or little, effect of temperature on the process, except as the temperature affects the gas density.

In Figure G1, both the room temperature, 20°C, and the cryogenic temperature breakdown voltages, are graphed together as a function of both bar-mm (for the 20°C values) and (g/cm³)-mm, which apply to both the 20°C and the low temperature values. Within the scatter of the data, there does not appear to be a temperature difference in the breakdown voltage for the same density-spacing product. The bar-mm scale is shifted from the (g/cm³)-mm scale by the ratio of bars (pressure) for helium at 20°C to the gas density at that temperature :

The factor 1.0133 is added to convert from atmosphere pressure to bar pressure.

Notes on References to the Helium Paschen Curve

References [G1], [G2], [G3] and [G5] are references which present data only at low voltages near the Paschen minimum, but apparently using, in most cases, carefully purified helium. The Paschen minimum breakdown voltages of references [G1], [G2] and [G5] agree well :

[G1] Gill and Pidduck	: 156 volts
[G2] Levi	: 160-170 volts
[G5] Bortnik	: 160 volts

Reference [G3], Mc Callum and Klatzow, gives a higher value for the minimum, about 240 volts.

Reference [G5], Bortnik, extends tests to somewhat higher voltages (1900 volts). He also presents an extensive theoretical calculation of the Paschen curve in the low pressure minimum range ; the theory appears to agree with his experimental results, which are higher than other values reported, above the minimum pd value. He also has some interesting non-uniform field breakdown data.

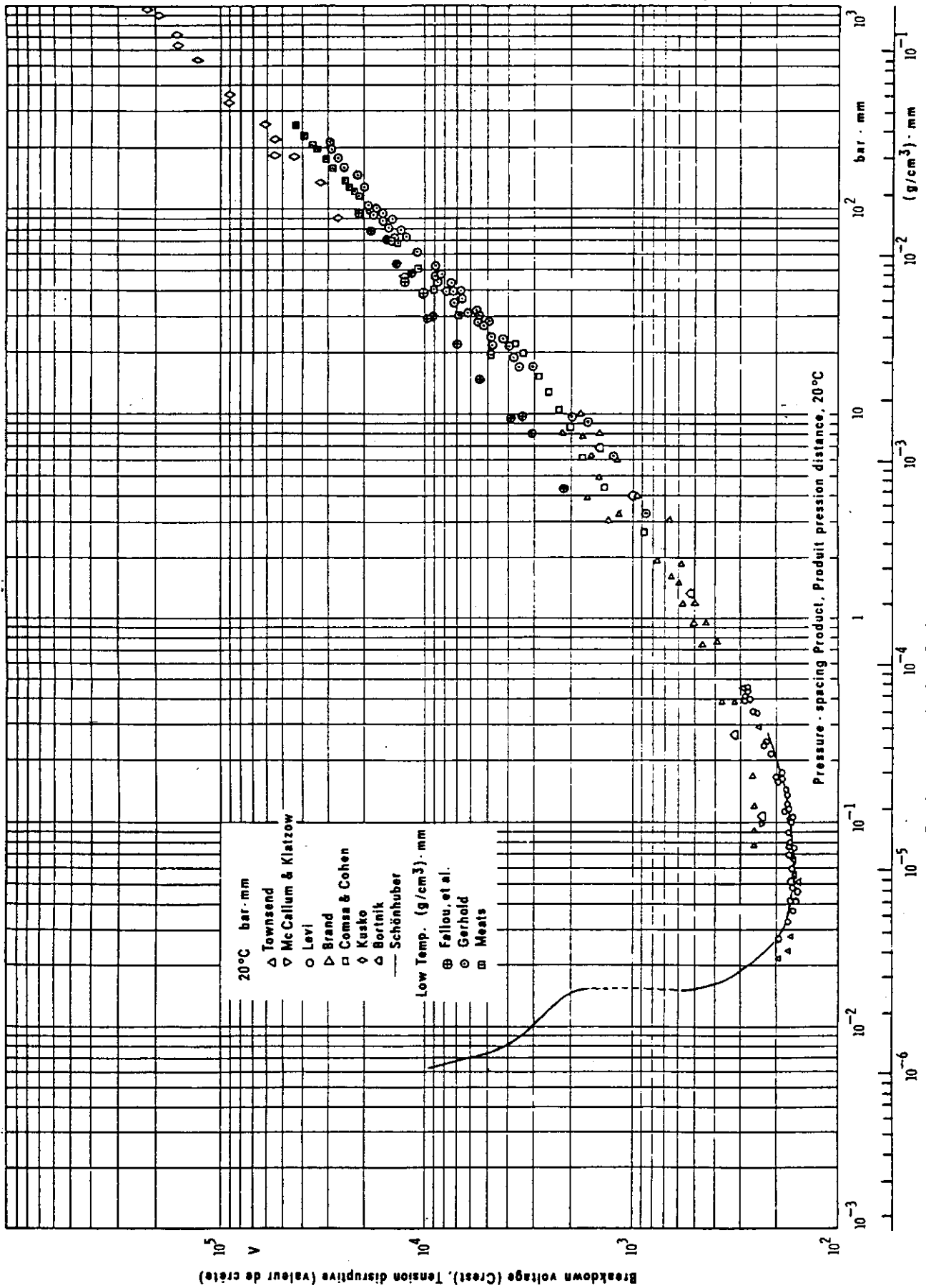


Figure G1 - Courbe de Paschen pour l'hélium en échelles logarithmiques. Température 20°C.
 Paschen curve for helium in log log scale. Temperature 20°C.

Schönhuber dans une publication plus récente [G7] fait état de recherches effectuées avec soin sur la tension disruptive au voisinage et au-dessous du minimum de Paschen. Il utilise un ensemble d'électrodes spécialement étudié, consistant en électrodes planes encastées de façon à éviter une décharge à plus longue distance au voisinage du minimum de Paschen. Ses résultats concordent bien avec ceux des références [G1], [G2] et [G5] près du minimum de Paschen qu'il trouve entre 160 et 165 volts. Pour des valeurs du produit pression.écartement quelque peu au-dessus du minimum, ses résultats s'écartent pour se placer au-dessous de la courbe vraisemblable, sans doute à cause de la géométrie peu usitée des électrodes. On ne trouve pas de résultats individuels dans cette référence qui donne une courbe passant par le minimum de Paschen pour aller vers les valeurs plus faibles du produit pression écartement, au-dessous du minimum.

L'ensemble des données apparemment les plus exactes placent le minimum de Paschen pour l'hélium pur à 160 volts approximativement, pour 5×10^{-2} bar.mm.

Les données de Kusko [G4] couvrent le domaine des hautes pressions jusqu'à 85 bars, à la température ambiante, avec des écartements de 3 à 22 mm, pour de l'hélium techniquement pur. Ces résultats paraissent se placer au-dessus de la courbe tracée à partir des autres valeurs réunies, qui sont plus faibles, en faisant exception des valeurs de Fallou *et al.* [G9], obtenues aux basses températures. Il est significatif que les données de Kusko forment une courbe qui au premier chef est parallèle mais plus haute que celle extrapolée à partir de la majorité des données obtenues à plus faible tension. Ces données vont au-delà des limites de la figure G1, jusqu'à 375 kV pour 1900 bar.mm, qui est la tension disruptive la plus élevée dont il est rendu compte pour l'hélium. Les tensions disruptives données par Kusko semblent se déplacer régulièrement vers des valeurs légèrement plus élevées quand, pour les mêmes valeurs du produit bar.mm, l'écartement est augmenté. La courbe correspondant aux données obtenues pour un écartement de 22 mm tombe au-dessus de celle obtenue pour 12,7 mm qui à son tour est légèrement au-dessus de celle obtenue pour 3,18 mm. Le fait que cette différence soit due à une erreur expérimentale ou qu'elle soit théoriquement significative mérite d'être étudié.

Comsa et Cohen [G6] présentent des données pour un seul écartement, 1 mm, mais jusqu'à des pressions très élevées, 150 bars. Ces données, comprises entre 900 et 2900 volts, se situent sur la figure G1, parmi les autres ensembles de données.

Brand [G8] couvre un domaine s'étendant depuis le minimum de Paschen jusque vers 2000 volts. Ses résultats concordent relativement bien au-dessus de 500 volts environ avec la moyenne des autres données mais semblent trop élevés au voisinage du minimum de Paschen.

En première référence, dans le domaine des faibles températures, Fallou *et al.* [G9] donnent les résultats d'une vaste série d'essais, en champ uniforme et non uniforme, jusque vers 30 kV. Peu d'écart a été noté entre la tension disruptive en continu et en alternatif

Reference G7, Schönhuber is a more recently published careful investigation of the breakdown voltage at and below the Paschen minimum. He uses a specially designed electrode system consisting of recessed plane electrodes intended to avoid longer gap breakdown below the Paschen minimum. His results agree well with those of references [G1], [G2] and [G5] near the Paschen minimum, which he finds to be at 160 to 165 volts. At pressure-spacing values somewhat above the minimum, his values depart below the probable Paschen curve, due, probably, to his unusual electrode geometry. This reference did not present individual points and is graphed as a line extending through the Paschen minimum and to lower pressure-spacing values below the minimum.

The consensus of the apparently most correct data places the Paschen minimum for pure helium at approximately 160 volts at 5 to 7×10^{-2} bar.mm.

*The data of Kusko [G4], covers the high pressure range to 85 bar, at room temperature with spacings of 3 to 22 mm, using technically pure helium. His results seem to fall above the lower voltage curve, except the low temperature values of Fallou, *et al.* [G9]. It is significant that his data form a line which is essentially parallel to, but higher than, a majority of the extrapolated lower voltage data. His data extend beyond the limit of Figure G1 up to 375 kV at 1900 bar-mm, which is the highest breakdown voltage reported for helium. Kusko's breakdown voltages appear to shift regularly to slightly higher values when he tests higher spacings at the same bar-mm values. His data line for 22 mm spacing falls above that for 12.7 mm, which, in turn, is slightly above that for 3.18 mm. Whether this is due to experimental error or to a significant theoretically accountable difference needs to be considered.*

The reference [G6], Comsa and Cohen, presents data for only a single spacing, 1 mm, but extends to very high pressures, 150 bar. Their data, ranging from about 900 to 2900 volts, appear to fall within the midst of several other sets of data in Figure G1.

The reference [G8], Brand, covers a range from about the Paschen minimum up to 2000 volts. His data above about 500 volts agrees fairly well with the average of the other data, but appears to be too high in the vicinity of Paschen's minimum.

*In the low temperature region, the first reference [G9] of Fallou, *et al.* presents an extensive series of tests of both uniform and non uniform fields extending to about 30 kV. They noted little difference between d-c and a-c, crest voltage breakdown. An extrapolation of*

(valeur de crête). Une extrapolation des résultats montre que la courbe de Paschen de l'hélium tracée en fonction du produit masse volumique.écartement se place au-dessus de la valeur obtenue pour l'hélium liquide dont la masse volumique est, au point d'ébullition sous un atmosphère, $0,1248 \text{ g/cm}^3$. Dans la figure G1, les valeurs de la tension disruptive se placent sur une courbe parallèle mais au-dessus des valeurs données par Gerhold et Meats [G10] et [G12]. Cette différence peut être due à la transformation en masse volumique effectuée par Fallou et al., à partir des valeurs de pression et de température.

La référence [G11] donne des tensions disruptives aux faibles températures pour de grands écartements, jusqu'à 80 mm et à des températures comprises entre 6 K et 240 K. Ces données n'ont pas été reportées sur la figure G1 du fait que le champ électrique n'est pas, dans la plupart des cas, très uniforme (les électrodes utilisées étaient des sphères de 100 mm). Il se pose en outre quelques problèmes pour obtenir les valeurs convenables de la masse volumique à partir des données fournies dans la publication. Les résultats cependant devraient être techniquement utiles.

Les données de Gerhold et Meats [G10] et [G12], aux faibles températures, concordent bien entre elles et couvrent en grande partie les mêmes gammes de valeurs pour la masse volumique ou la tension. Les données de Meats sont présentées dans un diagramme de Paschen modifié, en fonction du produit du nombre d'atomes N par m^3 par l'écartement exprimé en mètres (N.m^{-2}). Le facteur de conversion est :

$$10^{24} (\text{N.m}^{-2}) = 0,67 \cdot 10^{-2} (\text{g/cm}^{-3}) \cdot \text{mm}$$

Gerhold et Meats montrent que la rigidité diélectrique du gaz, qui est environ 30 kV/mm à la pression et à la température critiques, ne présente pas de transition brutale par rapport à celle du liquide, pour la même masse volumique.

La tension disruptive dévie brusquement vers des valeurs au-dessous de la courbe de Paschen, quand le champ électrique excède 15 kV/mm. Il est remarquable que les autres gaz présentent une déviation similaire de la courbe de Paschen pour une même contrainte électrique. Meats remarque également que, tandis que la contrainte de rupture diélectrique tend à augmenter moins rapidement au-dessus de 15 kV/mm, elle augmente à nouveau brusquement quand elle atteint 30 kV/mm, pour des masses volumiques supérieures à $0,08 \text{ g/cm}^3$. Meats présente un diagramme pression-masse volumique intéressant et plein d'informations (figure 4 de sa publication) montrant le tracé des courbes d'égale rigidité diélectrique et des isothermes pour un écartement de 1 mm. Ce diagramme couvre principalement le domaine des champs électriques supérieurs à 15 kV/mm, pour lequel la loi de Paschen n'est pas vérifiée.

their data indicates that the Paschen curve for helium on a density-spacing basis falls above the value for liquid helium, whose density at the boiling point at 1 atm is 0.1248 g/cm^3 . In Figure G1, the values for breakdown voltage fall parallel to but above the range of values reported by Gerhold and Meats, [G10] and [G12]. The difference may be due to the density derivation by Fallou, et al., from pressure and temperature values.

The data of [G11], which presents breakdown voltages at low temperature at large gaps to 80 mm and temperatures between 6 K and 240 K has not been graphed, because the electric field in most cases is not very uniform (they used a 100 mm sphere), and there is some question about obtaining a proper density value from the data in the paper. The results, however, should be technically useful.

The low temperature data [G10] and [G12], Gerhold and Meats, agree well with each other and cover much the same range of gas density and voltage. Meats' data is presented in a modified Paschen graph with units of number of atoms/cubic meter \times meters, (Nm^{-2}). The conversion factor is :

$$10^{24} (\text{Nm}^{-2}) = 0.67 \times 10^{-2} (\text{g/cm}^3) \times \text{mm}.$$

Gerhold and Meats point out that the gas breakdown strength, which is about 30 kV/mm at the critical pressure and temperature does not change abruptly from that of the liquid at the same density.

The breakdown voltage departs abruptly to values below the Paschen curves when the stress exceeds 15.0 kV/mm. It is noteworthy that the other gases also show a similar departure from Paschen's curve at about the same voltage stress. Meats also notes that, while the helium breakdown stress starts to level off at stresses above 15 kV/mm, at higher stresses above 30 kV/mm and densities above 0.08 g/cm^3 , the breakdown stress increases abruptly again. He presents a most interesting and informative pressure-density graph (Figure 4 of his paper) showing contours of equal breakdown stress and isotherms for a 1 mm gap. This graph covers primarily the range of stress above 15 kV/mm, where Paschen's law is not followed.

Références pour l'hélium – References for helium

Helium Gas at Moderate Temperature – Hélium, gaz aux températures modérées

- [G1] Townsend, J.S. – *Electricity in Gases*, Oxford Press (1915) pp. 325-29, data from Gill and Pidduck, *Phil. Mag.*, series 6, 23, (1912), p. 837.
- [G2] Levi, Fritz. – *Annalen des Physik*, 6, (1930), p. 409, Fig. 3.
- [G3] Mc Callum, K. and Klatzow. – *Phil. Mag.* 17, 279, 1934.
- [G4] Kusko. – *Doctoral Dissertation*, Mass. Inst. of Technology, Cambridge, Mass., U.S.A. (1951).
- [G5] Bortnik, I.M. – *Soviet Physics - Technical Physics*, 9, (1964), p. 1495, Fig. 9 ; *IJ.* (1968), p. 769 ; See also Christyakov, P.N. *Ibid.*, 4, (1960), p. 1154.
- [G6] Comsa and Cohen. – *Trans. of the Eng. Inst. of Canada*, 8, N° 61, (1965), Fig. 2.
- [G7] Schönhuber, M.J. – *IEEE Transactions*, P.A.S. 88, (1969), p. 104, Fig. 7.
- [G8] Brand, U. – Unpublished 1972 report from Technical Univ., Braunschweig, Germany.

Helium Gas at very Low Temperatures – Hélium gaz aux très basses températures

- [G9] Fallou, B., Galand, J. and Bouvier, B. – *Cryogenics*, 10, (1970), pp. 142-6.
- [G10] Gerhold, J. – *Doctoral Thesis*, Technical Univ., Graz, Austria (1970).
- [G11] Thoris, J., Leon, B., Dubois, A., and Bobo, J. – *Cryogenics*, 10, (1970), pp. 147-149.
- [G12] Meats, R.J. – *Proc. IEEE (London)* 119 (1972), pp. 760-66.
- [G13] Mann, D.B. – *The Thermodynamic Properties of Helium from 3 to 300 K and Between 0.5 and 100 Atmospheres*, National Bureau of Standards, (U.S.A.), Technical Note 154 (1962).

Le CIGRÉ a apporté le plus grand soin à la réalisation de cette brochure thématique numérique afin de vous fournir une information complète et fiable.

Cependant, le CIGRÉ ne pourra en aucun cas être tenu responsable des préjudices ou dommages de quelque nature que ce soit pouvant résulter d'une mauvaise utilisation des informations contenues dans cette brochure.

Publié par le CIGRÉ
21, rue d'Artois
FR-75 008 PARIS
Tél. : +33 1 53 89 12 90
Fax : +33 1 53 89 12 99

Copyright © 2000

Tous droits de diffusion, de traduction et de reproduction réservés pour tous pays.

Toute reproduction, même partielle, par quelque procédé que ce soit, est interdite sans autorisation préalable. Cette interdiction ne peut s'appliquer à l'utilisateur personne physique ayant acheté ce document pour l'impression dudit document à des fins strictement personnelles.

Pour toute utilisation collective, prière de nous contacter à sales-meetings@cigre.org

The greatest care has been taken by CIGRE to produce this digital technical brochure so as to provide you with full and reliable information.

However, CIGRE could in any case be held responsible for any damage resulting from any misuse of the information contained therein.

*Published by CIGRE
21, rue d'Artois
FR-75 008 PARIS
Tel : +33 1 53 89 12 90
Fax : +33 1 53 89 12 99*

Copyright © 2000

All rights of circulation, translation and reproduction reserved for all countries.

No part of this publication may be produced or transmitted, in any form or by any means, without prior permission of the publisher. This measure will not apply in the case of printing off of this document by any individual having purchased it for personal purposes.

For any collective use, please contact us at sales-meetings@cigre.org