Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 59 (1968)

Heft: 26

Artikel: A propos du comportement à la décharge disruptive de l'air sollicité par une tension continue élevée

Autor: Peschke, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057438

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 23.08.2025

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

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Organe commun de l'Association Suisse des Electriciens (ASE)
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité (UCS)

A propos du comportement à la décharge disruptive de l'air sollicité par une tension continue élevée

Par *E. Peschke*, Munich

537.527:546.217
(Traduction)

Des mesures relatives à la distance explosive, à la contre-électrode, à la forme de l'électrode et à l'humidité atmosphérique furent exécutées à des tensions continues positives et négatives sur des électrodes non-homogènes, unilatéralement reliées à la terre. On disposa pour ces recherches d'un laboratoire climatique de 120 m³ de volume et d'une halle partiellement climatisée de 15 000 m³. Les plus grandes distances explosives atteignirent dans le laboratoire climatisé 1 m (tension d'essai maxima 500 kV), et dans la halle à haute tension 2,5 m (max. 1,4 MV).

Le résultat connu à la suite de la publication des mesures effectuées par plusieurs auteurs, et spécifiant qu'une relation proportionnelle existe entre la tension disruptive et la distance explosive, a pu être confirmé jusqu'au niveau de tension le plus élevé à l'aide des éclateurs à étincelles barre-plaque et barre-barre.

La limite inférieure de la rigidité diélectrique moyenne de l'air, fort importante au point de vue du dimensionnement, est déterminée d'après les résultats obtenus par la disposition d'une barre positive contre une plaque reliée à la terre. Dans l'air atmosphérique et dans les conditions normales, on détermina une rigidité diélectrique-limite d'une valeur de 5 kV/cm. Cette rigidité diélectrique demeure jusqu'à une distance de 2,5 m indépendante de la distance explosive, mais sera toutefois fortement influencée par l'humidité atmosphérique.

An inhomogenen, einseitig geerdeten Elektrodenanordnungen wurden bei positiver und negativer Gleichspannung Messungen über den Einfluss der Schlagweite, der Gegenelektrode, der Elektrodenform und der Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Für die Untersuchungen standen ein Klimalaboratorium mit 120 m³ Rauminhalt und eine teilklimatisierte Halle mit ca. 15 000 m³ zur Verfügung. Die grösstmöglichen Schlagweiten betrugen im Klimalaboratorium 1 m (max. Prüfspannung 500 kV), in der Hochvolthalle 2,5 m (max. 1,4 MV).

Das aus informatorischen Messungen mehrerer Autoren bekannte Ergebnis, dass zwischen Durchschlagspannung und Schlagweite ein proportionaler Zusammenhang besteht, konnte an der Stab-Platte- sowie an der Stab-Stab-Funkenstrecke bis zur maximalen Spannungshöhe bestätigt werden.

Die für Dimensionierungszwecke wichtige untere Grenze der mittleren Luftfestigkeit wird nach den vorliegenden Ergebnissen durch die Anordnung positiver Stab gegen geerdete Platte bestimmt. In atmosphärischer Luft unter Normalbedingungen konnte für die Grenzfestigkeit ein Wert von 5 kV/cm ermittelt werden. Dieser Festigkeitswert ist bis zu 2,5 m von der Schlagweite unabhängig, er wird jedoch von der absoluten Luftfeuchtigkeit stark beeinflusst.

1. Introduction

La première transmission d'énergie fut une transmission à courant continu, exécutée en 1882 sur l'initiative de *O. v. Miller* et *M. Deprez*, s'étendant sur une distance de 57 km de Miesbach à Munich. Le succès de la technique à courant continu fut toutefois freiné à la suite de la découverte que de grandes puissances ne peuvent être transmises d'une manière économique sur des distances étendues qu'à l'aide de tensions relativement élevées. Le courant triphasé termina en outre victorieusement sa compétition avec le courant continu par le fait que ces tensions élevées furent facilement produites à l'aide de transformateurs et que l'on pouvait également construire l'unité générateur/transformateur à la puissance requise. Au bout de peu d'années déjà, le bien-fondé de cette conception, tendant d'appliquer du courant triphasé à la transmission d'énergie, s'était imposé aussi clairement que définitivement.

Or, en comparant les propriétés des deux systèmes, les avantages ne se limitent pas exclusivement au courant triphasé. Pour une même puissance transmise, une ligne aérienne à courant continu revient meilleur marchée qu'une ligne aérienne à courant triphasé. L'absence du problème de stabilité sur de grands parcours de transmission, resp. lors du couplage des réseaux triphasés étendus à l'aide d'une ligne à courant continu, rend ce genre de courant fort intéressant et approprié à la solution de certaines tâches relatives à l'approvisionnement en énergie. A cela s'ajoute en outre la propriété avantageuse d'une transmission à courant continu de ne pas introduire au réseau perturbé une puissance de court-circuit supplémentaire. Ces faits laissèrent ainsi subsister sans cesse le désir d'un transport d'énergie à courant continu à haute tension, brièvement dénommé HGU [1][1]).

A la suite du développement des convertisseurs de courant à vapeur de mercure, ouvrant des perspectives nouvelles à la production de tensions continues élevées en unités de puissance suffisante, on se souvenait à nouveau de la transmission à courant continu lors de l'approvisionnement électrique. Personne, bien entendu, ne songe à remplacer les réseaux de distribution triphasés existants par des lignes à courant continu. La HGU bénéficiera toutefois d'une chance dans toutes les tâches de transmission d'énergie électrique où elle constitue soit la solution unique, soit la solution la plus avantageuse du point de vue économique ou technique [2].

Par suite de l'importance trop restreinte, témoignée pendant des décades au courant continu dans la transmission d'énergie électrique, les recherches furent quelque peu négligées dans ce domaine. Bien que des lignes aériennes HGU d'env. 700 km de longueur fonctionnent déjà et qu'env. 3000 km seront prochainement mis en service, on ne dispose pas

[1]) Voir bibliographie à la fin de l'article.

encore de recherches systématiques se rapportant p. ex. au comportement à la décharge disruptive et au contournement en tension continue dans la disposition technique des électrodes. Le présent exposé s'est ainsi proposé comme tâche d'esquisser les bases servant non seulement à une meilleure compréhension des phénomènes aboutissant à la tension disruptive et au contournement, mais permettant également de spécifier les lois générales se rapportant à la tension disruptive et la distance explosive, ainsi qu'à d'autres paramètres importants au point de vue de l'application pratique.

2. Installations et dispositions d'essai

Pour les mesures, on disposa d'un laboratoire climatisé d'une surface utile de 6,5×4,5 m et d'une hauteur de 4 m (fig. 1). L'introduction de la haute tension à l'installation d'essai du local s'effectua par une traversée verticale, partant d'un laboratoire à haute tension situé à l'étage supérieur et disposant d'une installation à tension continue de 500 kV (fig. 2). Des essais effectués à une tension supérieure durent être exécutés dans un laboratoire plus vaste (dimensions 34×23×18 m) afin d'utiliser l'installation à tension continue de 1,4 MV qui s'y trouvait. Cependant que le laboratoire climatisé permettait de réaliser des essais de tension à des températures variant de −40 à +80 °C et à une humidité relative d'env. 20 à 95 %, les travaux exécutés dans la grande halle (par la suite dénommée halle à haute tension) ne bénéficièrent que d'une climatisation partielle (température ambiante $\vartheta = 20$ °C; humidité relative $\varphi_r < 50$ %).

Les installations aménagées dans les deux laboratoires furent construites sur le principe du redressement à sens unique. Le courant nominal des redresseurs au sélénium se situa à 60 mA; on pouvait rapidement prélever des courants en charge jusqu'à 300 mA. Le condensateur de lissage accusa dans l'installation de 500 kV une capacité de 48 nF, et dans l'installation de 1,4 MV une capacité de 16 nF. L'ondulation (mesurée de crête en crête), rapportée à la valeur moyenne de la tension continue appliquée à l'objet soumis à l'essai, atteignit même aux plus fortes charges de courant moins de 5 ‰. La mesure de la tension s'effectua dans les deux cas au moyen de diviseurs de tension ohmiques, directement reliés au condensateur de lissage. La résistance à haute tension d'un diviseur de

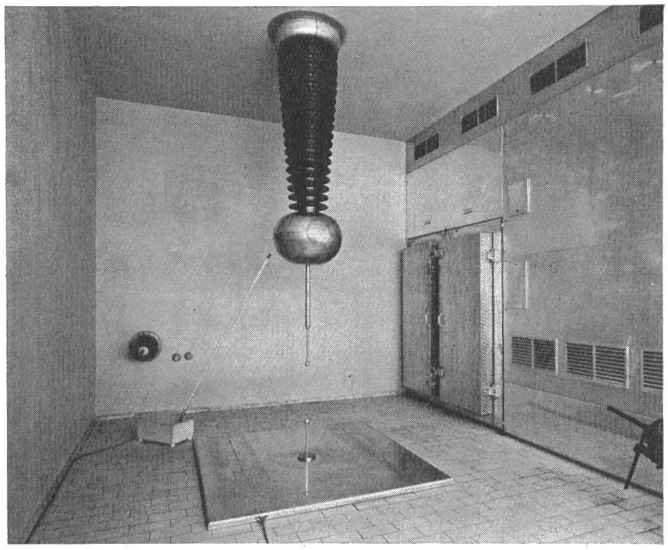

Fig. 1
Laboratoire climatique avec disposition d'essai

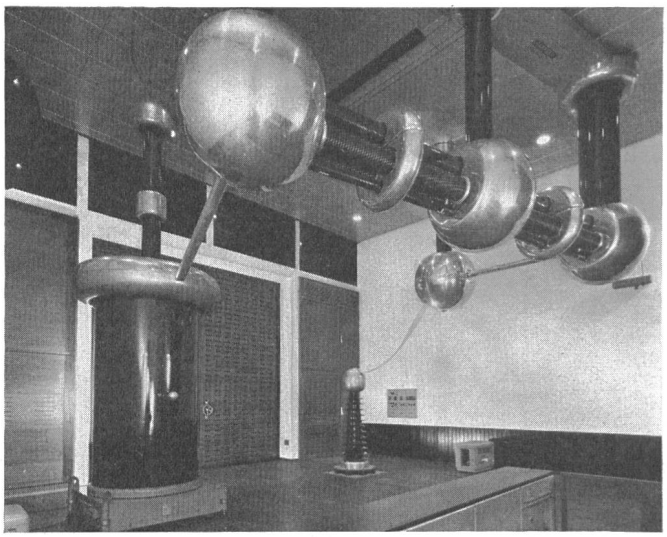

Fig. 2
Installation à tension continue de 500 kV avec traversée au laboratoire climatique

500 kV atteignit 1960 MΩ, et pour le diviseur de 1,4 MV 4250 MΩ. L'erreur d'indication se chiffra à env. ±2 %.

Tous les essais réalisés au laboratoire climatisé et à la halle à haute tension furent exécutés à l'aide de dispositifs d'essai verticaux avec mise à la terre unipolaire et allure hétérogène du champ. A cet effet on utilisa principalement la disposition barre-plaque (avec plaque reliée à la terre) et barre-barre. L'éclateur barre-plaque s'avéra particulièrement avantageux à la réalisation de telles recherches de base. Dans cette disposition asymétrique des électrodes, le développement de la prédécharge peut être limité à l'électrode fortement courbée, ce qui permet d'étudier l'influence d'une forme spécifique de décharge sur le développement de la décharge disruptive. En dehors de l'éclateur barre-plaque, la configuration barre contre barre bénéficie également d'une importance fondamentale. Le diamètre des barres atteignit dans tous les cas 2 cm. La plaque utilisée dans l'installation aménagée dans le laboratoire climatisé accusa des dimensions de 200×200 cm (distance maxima des électrodes 100 cm), et la plaque de la halle à haute tension 400×400 cm (écartement maximum des électrodes 250 cm).

La forme de l'électrode située à l'extrémité de la barre exerce une influence prépondérante sur la formation de la décharge, et de ce fait sur l'élévation de la tension disruptive. Afin d'obtenir des phénomènes de prédécharge différenciés et caractéristiques, on utilisa 4 formes d'électrodes: une pointe avec un rayon de courbure de 0,3 mm et un angle d'ouverture de 30°; une hémisphère de 2 cm de diamètre, puis des sphères de 5 et 15 cm de diamètre. Tous les essais réalisés avec l'éclateur barre-barre furent exécutés à l'aide d'une disposition symétrique, c'est-à-dire avec des électrodes terminales de même dimension.

3. Exécution et évaluation des mesures

Par suite de l'influence considérable exercée par la densité de l'air sur la hauteur de la tension disruptive, on a pris l'habitude de convertir les valeurs mesurées des tensions aux conditions normales (température ambiante $\vartheta_0 = 20$ °C; pression d'air $b_0 = 760$ torr; humidité absolue $\varphi_{a0} = 11$ g/m³). Pour des variations assez faibles de la pression et de la température de l'air on utilise un procédé d'approximation proportionnel à la densité de l'air δ. Des déviations de l'humidité de

l'air par rapport à la valeur de référence φ_{a0} sont rectifiées par un facteur de correction k. La publication CEI No. 60 [4] indique pour cette conversion la formule suivante:

$$(U_d)_{\vartheta_0;b_0;\varphi_{a0}} = \frac{1}{\delta} k \cdot (U_d)_{\vartheta;b;\varphi_a}$$

avec

$$\delta = \frac{b}{b_0} \cdot \frac{273 + \vartheta_0}{273 + \vartheta}$$

Jusqu'à présent toutefois, des facteurs de correction relatifs à l'humidité de l'air et se rapportant aux sollicitations à tension continue ne sont pas encore connus. Vu que l'influence de la densité de l'air n'est pas entièrement élucidée nonplus, la plupart des mesures furent effectuées à la même température (20 °C) et la même humidité absolue (11 g/m³). Seule la pression de l'air n'a pu être maintenue constante. Les variations de pression pendant toute la durée des essais n'étaient pas bien grandes et se limitaient à env. 720 ±15 torr. Afin de tenir compte de cette influence, on eut recours aux formules précitées.

Le genre et la rapidité de l'augmentation de tension peut revêtir une certaine importance au point de vue de la hauteur de la tension disruptive. En s'inspirant des augmentations de tension prescrites lors des essais à tension alternative par la publication VDE 0433, 1re partie, ainsi que des résultats obtenus par *Hill* [6], on précisa pour ces essais un cycle uniforme d'augmentation de tension: les premiers 75 % de la tension d'essai furent augmentés à raison de 28 kV/s, et les derniers 25 % par 7 kV/s. Au cours de tous les essais mentionnés dans les chapitres ultérieurs on intercalait uniformément un délai d'attente d'une minute entre deux sollicitations de tension, en effectuant après chaque décharge disruptive une mise à la terre du condensateur de lissage.

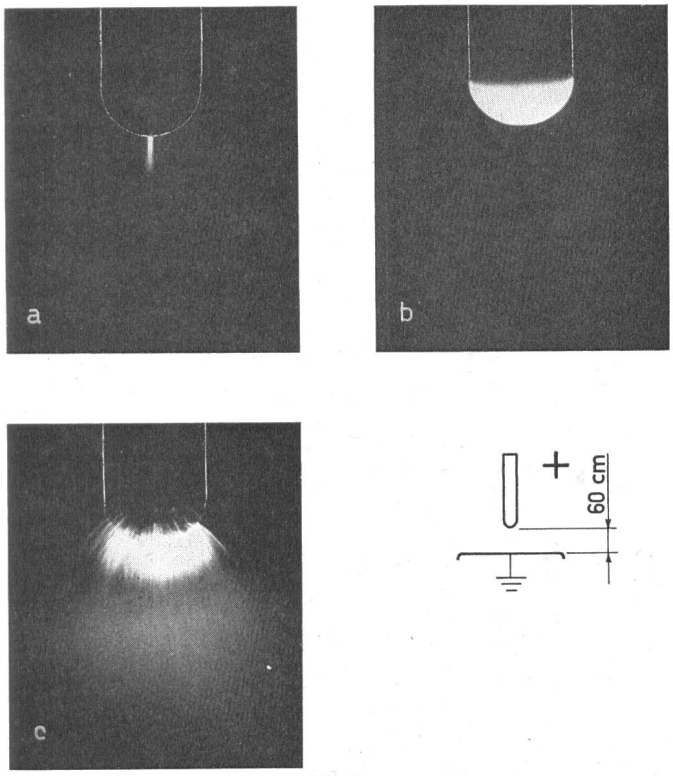

Fig. 3
Prédécharges se manifestant à une électrode à barre positive
a Décharge luminescente $U = 130$ kV
b Décharge à effluve $U = 200$ kV
c Décharge en aigrette $U = 280$ kV

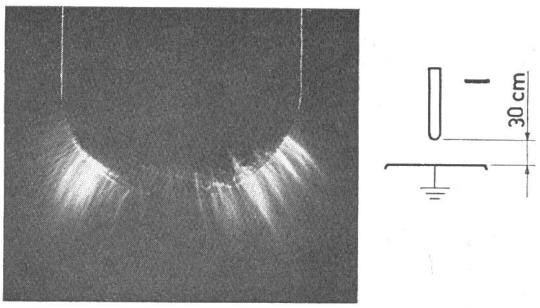

Fig. 4
Prédécharges se manifestant à une électrode à barre négative
Décharge en aigrette à effluve $U = 200$ kV

La publication VDE 0433 [5] propose en vue de la détermination des tensions disruptives et de contournement une évaluation statistique des résultats de mesure. Bien que les essais précités ne présentaient partiellement que des dispersions assez faibles, l'appréciation des résultats de mesure fut effectuée sur la base d'une évaluation statistique uniforme.

L'application de méthodes statistiques lors de l'évaluation des résultats exige en premier lieu de vérifier, si la répartition des valeurs individuelles de la série d'essai peut être approchée par une répartition normale. Un contrôle simple de l'ampleur dans laquelle la répartition de ces valeurs de mesure correspond à une répartition normale, permet la représentation graphique de la fréquence cumulée dans un réseau de probabilités. Vu qu'un volume d'échantillonnage $n = 20$ s'avéra suffisant pour tous les essais, les résultats des mesures furent inscrits d'après le procédé mentionné par *Henning* et *Wartmann* [7]. La question de savoir jusqu'à quel point la déviation de certains points isolés de la droite compensatrice peut être considérée comme accidentelle fut résolue par le test de *Klein* [8]. Cette épreuve relative à la compatibilité avec une répartition normale (lors d'une sécurité statistique bilatérale $P_d = 95\,\%$) s'avéra positive dans la plupart des mesures.

4. Prédécharges

Dans une disposition hétérogène des électrodes, la tension initiale et la tension disruptive ne sont pas simultanées. En dépassant la tension initiale, le phénomène de décharge se limite d'abord aux régions présentant une intensité de champ élevée, c'est-à-dire au voisinage immédiat de l'électrode fortement courbée. Les faibles intensités de champ dans les régions voisines rendent tout accroissement ultérieur impossible, de sorte que la rupture complète ne peut se manifester qu'à partir de ruptures partielles, et seulement après une élévation appropriée de la tension. Si des prédécharges se sont produites, le champ sera fortement déformé par le trajet des porteurs de charges et le développement de la décharge disruptive sera sensiblement influencé par les propriétés du mode de décharge prédominant. Les phénomènes de prédécharge se différencient tant dans leur aspect que dans le mécanisme de leur décharge d'après la polarité et la hauteur de la tension appliquée.

Dans la disposition barre-plaque (à barre positive) et barre-barre (positive et négative), la décharge disruptive se manifeste suivant la forme des électrodes à la suite de prédécharges par des décharges luminescentes, à effluves ou en aigrette. Dans le cas d'un éclateur négatif barre-plaque, la rupture complète en fonction de la distance des électrodes se manifeste à l'extrémité de la barre munie d'une pointe à 30° par des aigrettes à effluves ou des décharges en ronce. Dans les trois autres for-

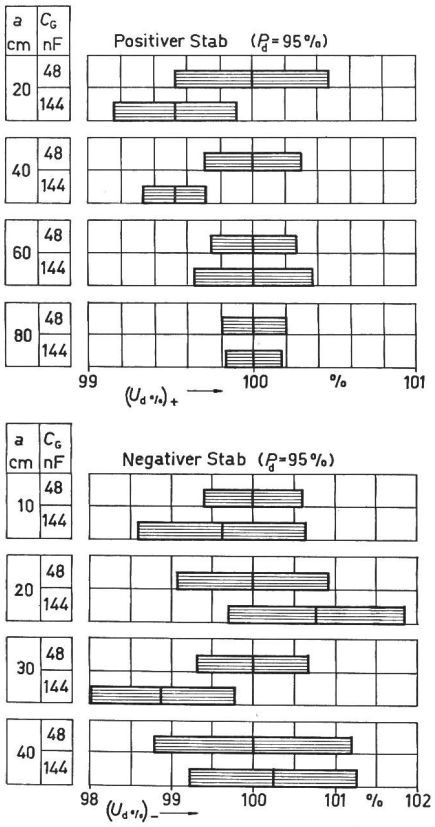

Fig. 5
Pourcentage du domaine de fiabilité de la tension disruptive $U_{d\,\%}$ relatif à deux capacités du condensateur de lissage
Disposition: barre-plaque; barre terminée par une hémisphère de 2 cm
Désignations voir le texte
Positiver Stab = barre positive
Negativer Stab = barre négative

mes d'électrodes, la rupture en polarité négative sera toujours amorcée lors du dépassement d'un certain niveau de tension par une décharge en aigrette à effluve.

Le tracé apparent de la décharge constitue en simple critère de la forme de la prédécharge. Les figures 3 et 4 représentent des tracés de décharge à polarité positive et négative de l'électrode terminale munie d'une hémisphère de 2 cm.

5. Résultats des essais

5.1 Influence de la capacité de lissage et de la résistance d'amortissement sur la tension disruptive

L'étude de l'influence exercée par la grandeur du condensateur de lissage C_G sur la tension disruptive fut examinée pour la disposition barre-plaque et deux capacités différentes. La capacité fixe, incorporée au condensateur de lissage de l'installation d'essai à 500 kV atteignit 48 nF; par le raccordement de deux condensateurs de même grandeur, cette capacité C_G put être augmentée à 144 nF.

Les résultats pour l'électrode à barre positive et négative et 4 distances différentes sont illustrés à la fig. 5. Afin d'obtenir une comparaison claire des valeurs moyennes de la tension disruptive pour différentes valeurs de C_G, les limites de fiabilité calculées sur la base d'une sécurité statistique de P_d 95 % furent mutuellement comparées. La valeur moyenne U_d d'épreuve calculée sur la base de 20 mesures disruptives se situe toujours au centre de ce domaine de fiabilité et sera caractérisée par une ligne verticale. La valeur moyenne pour C_G = 48 nF fut donc choisie comme valeur de référence et assimilée à 100 %.

Les domaines de fiabilité présentent tant à la polarité positive que négative et dans toutes les distances considérées des recouvrements mutuels. Ces recouvrements prouvent bien que les différences négligeables enregistrées dans les valeurs moyennes des tensions disruptives sont de nature parfaitement accidentelle. Avec une probabilité d'erreur de 5 %, on précise ainsi, que la tension disruptive n'est nullement influencée par un triplage de la capacité de lissage. Vu que les mêmes relations se présentent en outre lors de la comparaison des résultats de l'installation à 500 kV avec celle de 1,4 MV (rapport des capacités également 3:1), on peut en déduire d'une manière générale, que des capacités de plus de 16 nF paraissent parfaitement suffisantes pour l'essai des lignes de fuite pures-resp. des isolateurs propres.

La résistance d'amortissement R_d ne put être insérée qu'entre l'éprouvette et le diviseur de tension, ce qui nécessita un compromis lors de l'aménagement de cette résistance. Cette dernière devait d'une part être suffisamment élevée afin de limiter autant que possible la sollicitation thermique de la sur, face de l'électrode par l'arc de court-circuit. R_d ne devait d'autre part atteindre des valeurs trop élevées afin que le courant de prédécharge, et la chute de tension qui en résulte à R_d ne faussent pas les mesures de la tension disruptive.

L'influence exercée par R_d sur la tension disruptive fut également mesurée sur la disposition d'essai barre-plaque avec une électrode terminale munie d'une hémisphère de 2 cm. La résistance d'amortissement fut modifiée sur 4 étages de 4 MΩ sur 20 et de 2 KΩ...200 Ω, c'est-à-dire dans un rapport de $2 \cdot 10^4$.

Les résultats de ces mesures sont illustrés à la fig. 6 pour la polarité positive, et à la fig. 7 pour la polarité négative. La comparaison du pourcentage de fiabilité s'effectue dans ce cas également à l'aide de la valeur moyenne de la tension disruptive, en spécifiant à ce sujet une valeur moyenne de la résistance d'amortissement de 20 kΩ assimilée à 100 %.

Les domaines de fiabilité des tensions disruptives tant positives que négatives indiquent clairement que les valeurs moyennes pour 4 MΩ sont les plus élevées dans toutes les dis-

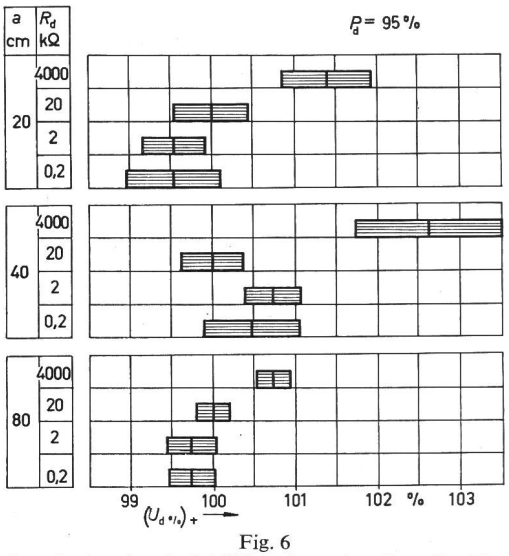

Fig. 6
Pourcentage du domaine de fiabilité de la tension disruptive $U_{d\,\%}$ positive, relatif à quatre résistances d'amortissement
Disposition: barre-plaque; barre terminée par une hémisphère de 2 cm
R_d résistance d'amortissement; a distance explosive; P_d sécurité statistique bilatérale

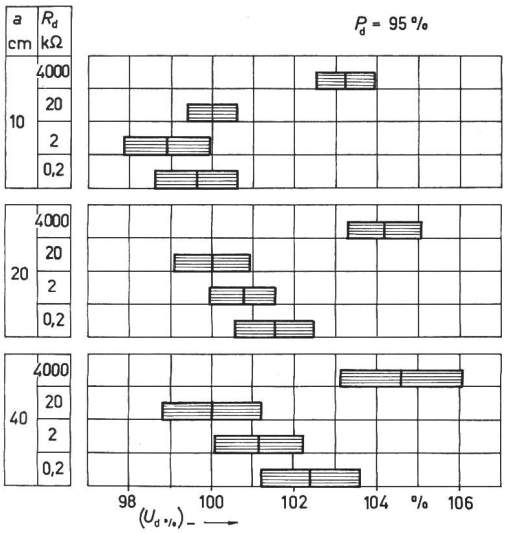

Fig. 7
Pourcentage du domaine de fiabilité de la tension disruptive $U_{d\,\%}$ négative, relatif à quatre résistances d'amortissement
Disposition: barre-plaque; barre terminée par une hémisphère de 2 cm
Désignations voir fig. 6

tances disruptives et ne se recouvrent — à une seule exception près — avec aucun des autres intervalles des valeurs moyennes. Pour les trois autres résistances plus faibles on enregistre toutefois un recouvrement des domaines limitrophes. Les résultats permettent de conclure, avec une probabilité d'erreur de 5 %, que les résistances d'amortissement de 20, 2 et 0,2 kΩ ne faussent pas d'une manière appréciable et mesurable les tensions disruptives. Pour la résistance de 4 MΩ, la position du domaine de fiabilité laisse déjà reconnaître à cette valeur de résistance une chute de tension causée par le courant de prédécharge. Tous les essais ultérieurs furent exécutés à l'aide d'une résistance d'amortissement de 20 kΩ.

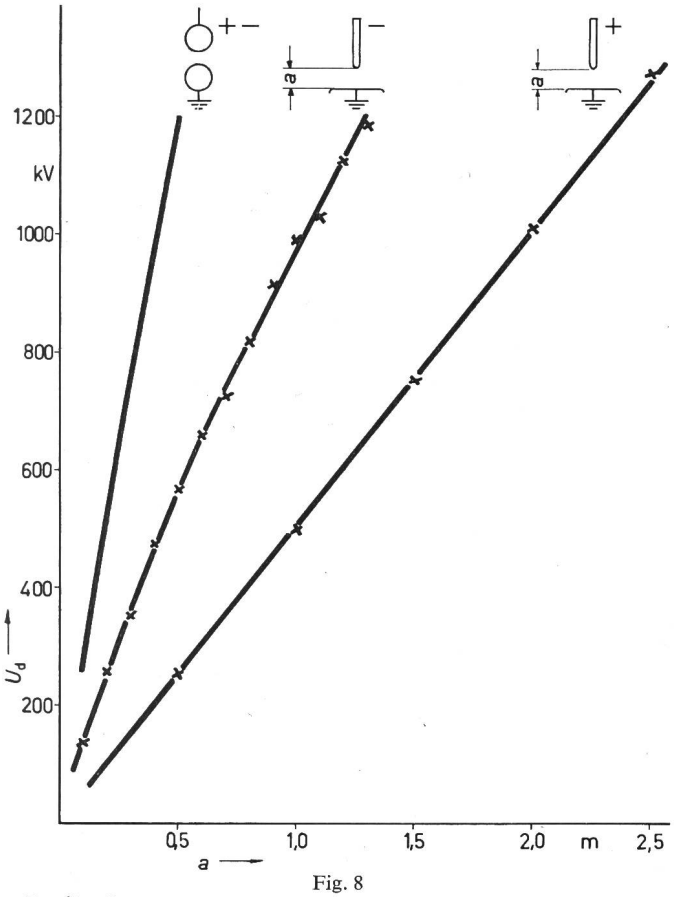

Fig. 8
Tension disruptive U_d d'une disposition barre-plaque en fonction de la distance explosive a
(aux conditions normales)
Barre terminée par une hémisphère de 2 cm

5.2 Dépendance de la tension disruptive de la distance explosive

L'influence exercée par la distance des électrodes sur la hauteur de la tension disruptive fut déterminée aux éclateurs barre-plaque et barre-barre jusqu'à une distance maxima de 2,5 m. Les résultats relatifs à la disposition barre-plaque sont illustrés à la fig. 8, et à la disposition barre-barre à la fig. 9. A titre de comparaison on a également reproduit à la fig. 8 la tension disruptive de l'éclateur à sphères (diamètre $d = 2$ m) selon VDE 0433.

Les recherches effectuées à l'éclateur asymétrique barre-plaque indiquèrent que la tension disruptive — pour une

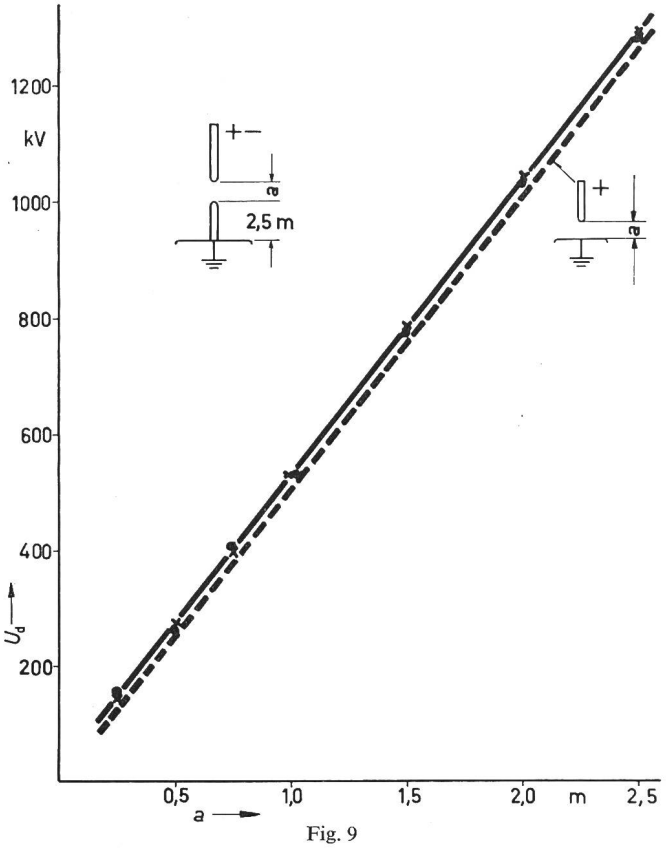

Fig. 9
Tension disruptive U_d d'une disposition barre-barre en fonction de la distance explosive a
(aux conditions normales)
—x— tension continue positive; —•— tension continue négative

même distance des électrodes — sera sensiblement plus basse pour la barre positive qu'à une polarité opposée de l'électrode fortement courbée. A une distance disruptive accrue, la dépendance accentuée de la tension disruptive diminue par suite de l'augmentation plus faible de (U_d). A des distances explosives $a > 50$ cm, la rigidité diélectrique de la distance explosive barre-plaque demeure toujours deux fois plus élevée par rapport à l'électrode à barre positive. Une comparaison des rigidités diélectriques moyennes à 1000 kV indique que les trois dispositions illustrées à la fig. 8 présentent un rapport mutuel de 5:2:1.

A l'éclateur positif barre-plaque (barre terminée par une hémisphère de 2 cm), la rupture se manifeste sur toute la distance ($20 \leqq a \leqq 250$ cm) par des impulsions de prédécharges

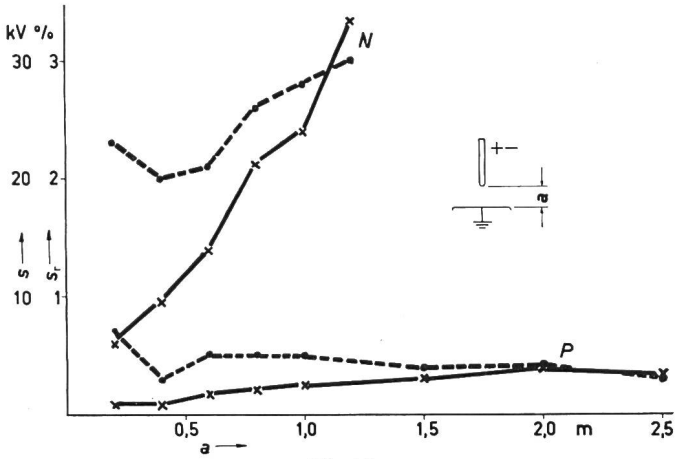

Fig. 10
Déviation-standard d'une disposition barre-plaque en fonction de la distance explosive a
Barre terminée par une hémisphère de 2 cm
—x— déviation-standard s; -- ● -- déviation-standard relative s_r
N négatif; P positif

sous forme de décharges luminescentes, resp. de décharges en aigrette. L'allure de la tension disruptive en fonction de la distance est caractérisée dans des conditions normales par une augmentation parfaitement linéaire. La droite tracée à la suite de 20 mesures individuelles accuse une pente de 5 kV/cm et fournit à la prolongation de l'ordonnée une intersection à env. 10 kV. A la polarité négative, la rupture se développe également à la suite de prédécharges pour toutes les distances étudiées. La fig. 8 indique que pour des valeurs élevées de a la courbure de la courbe disruptive devient tellement faible que $(U_d)_- = f(a)$ peut sans autre être approchée par une droite.

La dispersion des valeurs de mesure individuelles était généralement si faible qu'une représentation générale à l'aide des valeurs moyennes s'avéra superflue. Lors des mesures effectuées avec la barre positive, les dispersions standardisées s demeuraient au-dessous de 5 kV jusqu'aux tensions les plus élevées. La déviation-standard relative s_r fournit ainsi dans tous les cas des valeurs inférieures à 1 % (fig. 10). Pour une barre négative par contre, la dispersion des valeurs de mesure est plus accentuée. La dispersion-standard augmente en fonction des distances disruptives accrues et atteint pour $a = 1{,}2$ m env. 35 kV. La déviation-standard relative demeure toutefois au-dessous de la limite de 3 %. Afin de contrôler l'ampleur dans laquelle ces mesures sont reproductibles, on répéta les mesures plusieurs fois. Ce contrôle fournit — sous réserve de conditions ambiantes indentiques — une constance étonnante des valeurs disruptives.

D'après les résutats précités, la tension disruptive pour la disposition barre-plaque accuse pour les deux polarités un accroissement linéaire en fonction de la distance et peut être exprimé par la relation:

$$U_d = A + B_a$$

(si U_d est exprimé en kV et a en cm). Cette formule empirique fut déjà indiquée par *Schumann* [9] pour les caractéristiques

Constantes A et B pour la disposition barre-plaque Tableau I

Distances explosives cm	Polarité	A kV	B kV/cm
$20 \leqq a \leqq 250$	+	≈10	5,0
$50 \leqq a \leqq 120$	—	190	7,8

disruptives linéaires lors des sollicitations à tension alternative. Pour les constantes A et B on trouve d'après les mesures précitées — aux conditions normales et avec une électrode terminale hémisphérique de 2 cm — les valeurs mentionnées au tableau I. Les déviations des valeurs moyennes mesurées de la droite calculée demeurent dans tous les cas en-dessous de 2 %.

Les limites de la rigidité diélectrique de l'air aux sollicitations à tension continue sont fournies par la tension disruptive de la disposition barre-plaque et de l'éclateur à sphères (qui présente aux distances pas trop étendues la tension disruptive la plus élevée). Tandis que la rigidité diélectrique moyenne se situe pour l'éclateur à shpères à 25 kV/cm, elle atteint à la disposition positive barre-plaque seulement 5 kV/cm. Jusqu'à 1,2 MV, la rigidité-limite accuse ainsi un rapport de 5:1.

La dépendance aux tensions positives et négatives de la disposition barre-barre munie d'électrodes hémisphériques de 2 cm est indiquée à la fig. 9. A titre de comparaison on a également dessiné la droite se rapportant à la disposition positive barre-plaque. Le diagramme indique clairement que la dépendance de l'éclateur barre-barre pour les deux polarités ne dépasse que de quelques pourcents la droite disruptive de la disposition positive barre-plaque. Du fait des prédécharges qui se sont manifestées aux électrodes, tant aux tensions positives que négatives, on peut en déduire que, malgré l'influence mutuelle des charges locales, la prédécharge partant de l'anode exerce une influence déterminante sur la rigidité diélectrique de l'éclateur barre-barre. En constatant également dans cette disposition des électrodes une relation linéaire entre la tension disruptive et la distance des électrodes, on peut appliquer également dans ce cas la relation:

$$U_d = A + Ba$$

Pour les constantes A et B on détermina dans les conditions normales les valeurs numériques du tableau II. Là encore, les

Constantes A et B pour disposition barre-barre Tableau II

Distances explosives cm	Polarité	A kV	B kV/cm
$20 \leqq a \leqq 250$	+	20	5,1
$20 \leqq a \leqq 250$	—	≈15	5,1

tensions disruptives ne s'écartent jamais de plus de 2 % des valeurs calculées.

Dans cet éclateur, la dispersion des diverses valeurs de mesure individuelles est très faible. La déviation-standard augmente aux deux polarités en fonction de l'accroissement de la tension. La déviation-standard relative se limite dans ce cas à < 1 %! Dans la dispersion des valeurs individuelles, la disposition barre-barre demeure donc également presque indentique à l'éclateur barre-plaque.

Les valeurs moyennes pour la disposition barre-barre (fig. 9) coïncident pratiquement aux deux polarités, c'est-à-dire que l'influence de la polarité ne se manifeste plus dans ce cas particulier. Afin d'illustrer ce comportement à la décharge disruptive, les pourcentages des domaines de fiabilité des diverses valeurs moyennes pour $P_d = 95$ % de $a = 25...250$cm sont confrontés à la fig. 11. La valeur disruptive d'une tension continue positive fut assimilée pour chaque distance à la valeur de référence de 100 %. Cette représentation indique clairement que les domaines de fiabilité se recouvrent à toutes

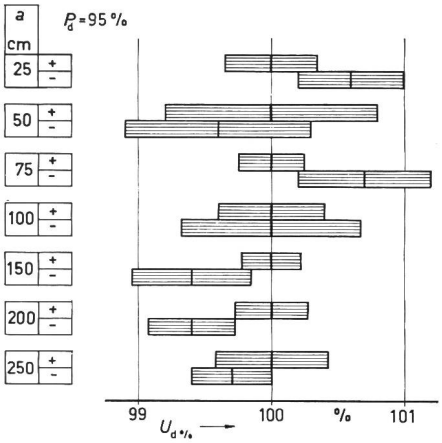

Fig. 11
Pourcentage des domaines de fiabilité pour tensions disruptives $U_{d\,\%}$ positives et négatives
(voir fig. 9)
Disposition: barre-barre; barre terminée par une hémisphère de 2 cm
a distance explosive; P_d sécurité statistique bilatérale

les distances et que les valeurs moyennes ne s'écartent mutuellement pas plus de $\pm 0{,}5$ %.

Par suite de sa faible dispersion, de la linéarité de sa dépendance de la distance et de son indépendance à l'égard de la polarité lors d'une disposition appropriée, l'éclateur barre-barre constitue une excellente installation de mesure pour tensions continues élevées et très élevées. Dans le paramètre de 100...1200 kV, cette disposition constitue par suite de la production de prédécharges, et de ce fait de la formation de charges locales stabilisatrices, un instrument de mesure extrêmement exact. Tandis que les mesures de tensions continues élevées à l'aide d'un éclateur à électrodes sphériques ne fournissent à cause de sa sensibilité aux poussières et aux fibres de l'air, ainsi que de la formation possible de charges locales,

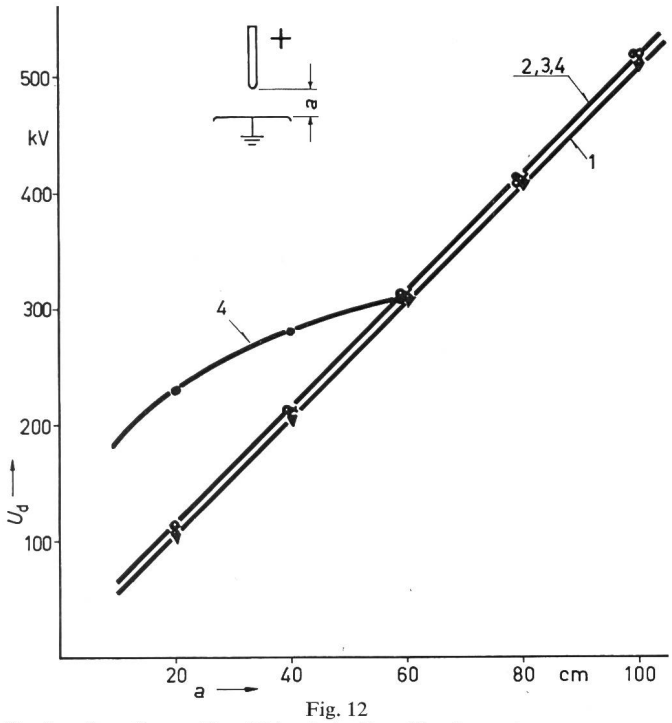

Fig. 12
Tension disruptive positive $(U_d)_+$ de la disposition barre-plaque pour quatre électrodes terminales à barres
(aux conditions normales)
a distance explosive; *1* pointe à 30°; *2* hémisphère de 2 cm; *3* sphère de 5 cm; *4* sphère de 15 cm

qu'une précision de ± 5 % [10], l'éclateur à barres sensiblement plus simple et meilleur marché permet d'atteindre avec sûreté une précision de ± 2 %. Cette disposition évite en outre toutes les décharges disruptives anormales bien connues dans les éclateurs à électrodes sphériques.

5.3 Dépendance de la tension disruptive de la forme des électrodes

L'influence exercée par les diverses électrodes à barres sur la tension disruptive positive de la disposition barre-plaque est illustrée à la fig. 12. Les recherches relatives à ces grandeurs d'influence ont été effectuées avec les formes d'électrodes décrites au chapitre 2.

Dans les trois électrodes fortement courbées, la rupture s'effectue dans tous les paramètres de 20...100 cm par des décharges luminescentes, resp. en aigrette; la tension disruptive demeure approchant constante dans toutes ces trois formes

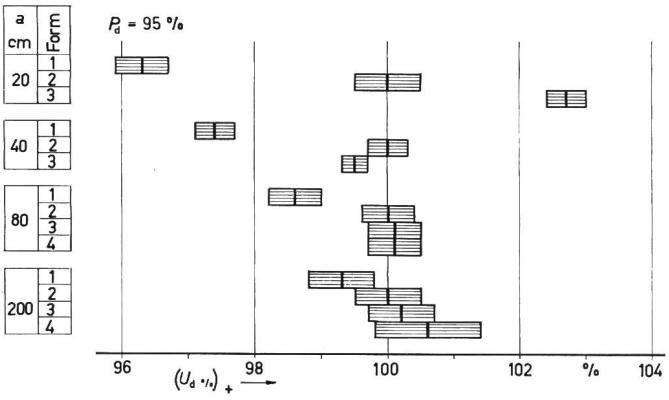

Fig. 13
Pourcentage des domaines de fiabilité de la tension disruptive positive $(U_{d\,\%})_+$ pour 4 électrodes à barres
(voir fig. 12)
Disposition barre-plaque
a distance disruptive; P_d sécurité statistique bilatérale
Forme *1*: pointe à 30°; *2*: hémisphère de 2 cm; *3*: sphère de 5 cm; *4*: sphère de 15 cm

précitées. Seule, la pointe à 30° accuse une tension disruptive d'env. 5 kV inférieure à celle des deux autres électrodes. L'éclateur à électrodes sphériques de 15 cm constitue une exception en ne présentant jusqu'à une distance de $a < 60$ cm pas de prédécharge avant la décharge proprement dite. A cette électrode, la rupture n'est également amorcée par une décharge luminescente qu'à partir de $a < 60$ cm. La courbe disruptive, d'abord courbée, adopte après cette modification la fonction linéaire des autres formes d'électrodes. Le pourcentage de fiabilité des valeurs moyennes de rupture des diverses électrodes laisse reconnaître que les conditions représentées sont conservées jusqu'aux distances disruptives les plus étendues (fig. 13).

Des résultats relatifs à la disposition positive barre-plaque on peut déduire d'une manière certaine, que la rupture s'effectue après la formation de la décharge luminescente ou en aigrette d'une manière parfaitement indépendante de la courbure de l'électrode terminale. Dès lors, seule la distance entre les électrodes exerce une certaine influence sur la hauteur de la tension disruptive. Ce fait a été plusieurs fois relevé au sujet des sollicitations à tension alternative [9; 11]. *Schumann* p. ex. remarque au sujet de la formule empirique, relative à la tension disruptive, que «les valeurs constantes *A* et *B* demeurent presque toujours indépendantes de la forme des électrodes.»

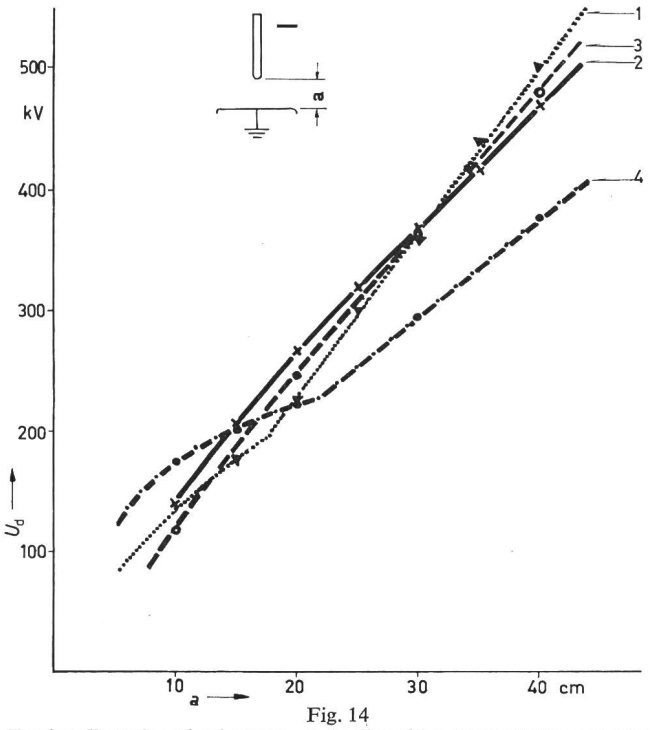

Fig. 14

Tension disruptive négative $(U_d)_-$ de la disposition barre-plaque pour quatre électrodes terminales à barres

(aux conditions normales)

a distance explosive; *1* pointe à 30°; *2* hémisphère de 2 cm; *3* sphère de 5 cm; *4* sphère de 15 cm

Les conditions décrites au chapitre 5.2 pour l'éclateur positif barre-plaque, équipé d'une hémisphère de 2 cm, peuvent ainsi être reportées aux autres formes d'électrodes. Le tableau I, renfermant les valeurs constantes des relations mathématiques entre la tension disruptive et l'écartement des électrodes demeure de ce fait également valable pour les autres formes d'électrodes.

A l'opposé de ces conditions se rapportant à la disposition positive barre-plaque, la forme de l'électrode terminale assume à la polarité négative et aux tensions jusqu'à 1 MV une influence déterminante. Conformément à la rigidité diélectrique négative plus élevée, cette influence n'a pu être prouvée à l'aide de l'installation à 500 kV que jusqu'à un écartement de 40 cm des électrodes.

Les relations représentées à la fig. 14 pour les distances de 10 à 40 cm indiquent déjà la tendance de l'allure ultérieure des courbes disruptives. Tel qu'on le mentionna déjà au sujet de l'hémisphère de 2 cm, une relation linéaire entre $(U_d)_-$ et l'écartement ne se manifeste qu'à partir de $a \geqq 50$ cm (fig. 15). Il convient en outre de retenir le fait, que l'électrode avec la courbure la plus forte (pointe de 30°) présente la rigidité disruptive la plus élevée, et l'électrode avec la courbure la plus faible (sphère de 15 cm) la rigidité diélectrique la plus faible.

Constantes A et B pour la disposition négative barre-plaque pour diverses électrodes à barres

Tableau III

Distances explosives cm	Forme de l'électrode	*A* kV	*B* kV/cm
$50 \leqq a \leqq 120$	pointe à 30°	165	9,2
	hémisphère 2 cm	190	7,8
	sphère 5 cm	150	9,2
	sphère 15 cm	80	7,8

Les valeurs constantes *A* et *B* déduites des courbes mesurées en vue du calcul de $(U_d)_-$ sont mentionnées pour toutes les formes d'électrodes au tableau III.

Les mesures, effectuées tant au laboratoire climatisé qu'à la halle de haute tension, indiquent pour la pointe de 30° et pour $a \approx 20$ une brisure accentuée à la fonction disruptive. Cette brisure indique le changement de la décharge en aigrette à effluve en une décharge en ronce. Tel que les courbes pour l'hémisphère de 2 cm et pour la sphère de 5 cm le laissent présumer, ces électrodes ne laissent reconnaître aucune modification de la forme des prédécharges négatives. La brisure du tracé de la courbe de l'électrode terminale de 15 cm indique l'amorçage de la prédécharge. Dans le domaine de $a \leqq 20$cm, la rupture survient pour cette forme d'électrode sans décharges partielles décelables (fig. 14 et 15).

Dans l'éclateur barre-barre, si intéressant au point de vue technique [14], la rigidité diélectrique est en grande mesure déterminée par les prédécharges partant de l'électrode positive. Vu que les électrodes fortement courbées permettent généralement d'observer des prédécharges à l'anode, on peut présumer dans ce cas une influence des électrodes sur la tension disruptive comparable à la disposition positive barre-plaque.

Cette présomption est du reste confirmée par les résultats mentionnés à la fig. 16. Les trois électrodes fortement courbées ont fourni des courbes disruptives de même pente, présentant uniquement un décalage parallèle de quelques pourcents. De même qu'à la disposition positive barre-plaque, la pointe de 30° présente la rigidité diélectrique la plus faible. La sphère de

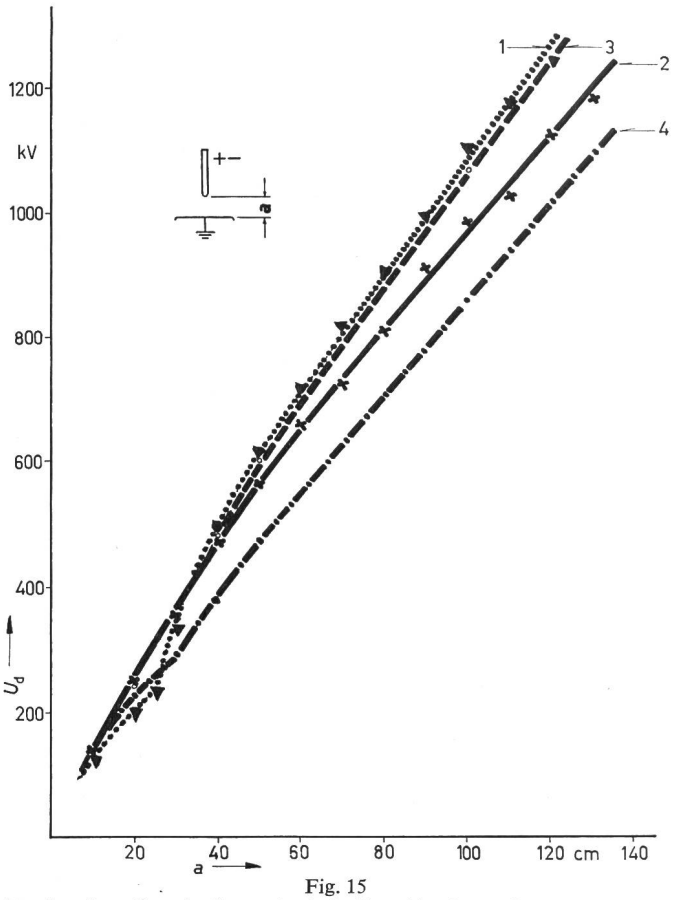

Fig. 15

Tension disruptive négative $(U_d)_-$ de la disposition barre-plaque pour quatre électrodes terminales à barres

(aux conditions normales)

a distance explosive; *1* pointe à 30°; *2* hémisphère de 2 cm; *3* sphère de 5 cm; *4* sphère de 15 cm

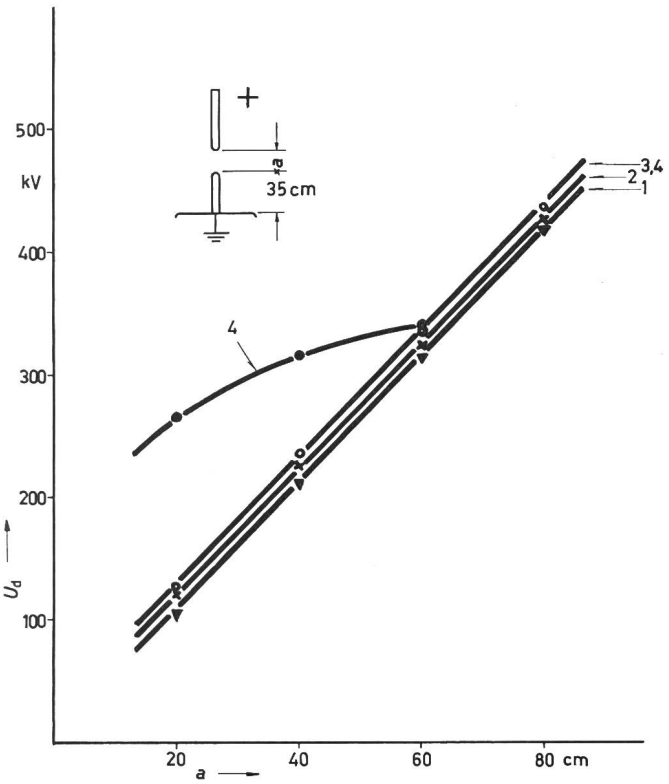

Fig. 16
Tension disruptive positive $(U_d)_+$ de la disposition barre-barre pour quatre électrodes terminales à barres
a distance explosive; *1* pointe à 30°; *2* hémisphère de 2 cm; *3* sphère de 5 cm; *4* sphère de 15 cm

15 cm constitue également dans ce cas une exception: pour des distances inférieures à 60 cm, la tension disruptive sera sensiblement plus élevée par rapport aux autres électrodes. A cet écartement, la rupture s'effectue sans prédécharges. Après la décharge à l'anode, la courbe disruptive est fortement brisée afin d'adopter le même tracé que celui de la sphère de 5 cm.

A la polarité négative, les électrodes fortement courbées présentent très tôt l'amorçage des prédécharges à l'anode. Dans ce cas, l'influence exercée par la forme de l'électrode est reléguée à l'arrière-plan. Des électrodes à courbure plus faible (p. ex. la sphère de 5 cm) présentent à la barre reliée à la terre des tensions d'amorçage plus élevées qui contribuent ainsi plus longtemps à la conservation de l'influence de la forme. Les résultats illustrés à la fig. 17 confirment ces déductions. La sphère à 15 cm présente dans ce diagramme un tracé à première vue anormal. Des observations précises permirent toutefois de constater qu'aucune prédécharge n'eut lieu dans cette disposition à la sphère anodique. Aucune dépendance de la polarité, ni aucun tracé rectiligne caractéristique de la fonction disruptive ne pouvaient se manifester dès lors.

La faible dépendance de la tension disruptive de la forme des électrodes fortement courbées constitue une autre caractéristique remarquable de l'aptitude aux mesures de la disposition barre-barre.

5.4 Dépendance de la tension disruptive de l'humidité atmosphérique

Même une étude bibliographique très fouillée ne fournit aucune documentation utilisable relative à l'influence de l'humidité atmosphérique sur la tension disruptive dans les dispositions d'électrodes non-homogènes. Du fait que l'influence de l'humidité revêt une importance particulière dans un essai de tension, le point de gravité de nos propres recherches a été concentré sur ce problème.

Tel qu'on l'a déjà constaté lors des essais à tension alternative, le développement et la forme des prédécharges revêt une importance décisive au point de vue de la dépendance de la tension disruptive à l'égard de l'humidité. Les 4 formes d'électrodes mentionnées au chapitre 2 permettaient de réaliser tous les phénomènes caractéristiques de décharge se rapportant à la tension initiale jusqu'à la tension disruptive. Ces électrodes furent de ce fait également utilisées dans les recherches ultérieures.

L'influence de l'humidité fut examinée à une température constante $\vartheta_0 = 20\ ^0$C. Une relation proportionnelle existe dès lors entre l'humidité relative et absolue suivant:

$$\varphi_r = \varphi_a/\varphi_{as}$$

avec une humidité absolue de saturation $\varphi_{as} = 17{,}3$ g/m³ = constante. Conformément aux limites préétablies de l'humidité relative, l'humidité absolue put être modifiée à ϑ_0 d'env. 3,5...16,5 g/m³.

Les figures 18, 19 et 20 illustrent de quelle manière la tension disruptive de la disposition positive barre-plaque se modifie d'après les variations de l'humidité atmosphérique. La tension disruptive est représentée dans ces diagrammes en fonction de la distance à des humidités différentes. La rupture à la pointe de 30° (fig. 18) s'effectue dans tous les cas sous forme d'aigrette à effluve. Le tracé rectiligne de la fonction disruptive demeurait conservé aux valeurs maxima et minima d'humidité réalisables à 20 °C. L'augmentation correspondante aux diverses valeurs d'humidité fut néanmoins différenciée. A 3,5 g/m³, la tension disruptive est d'env. 10 % inférieure aux

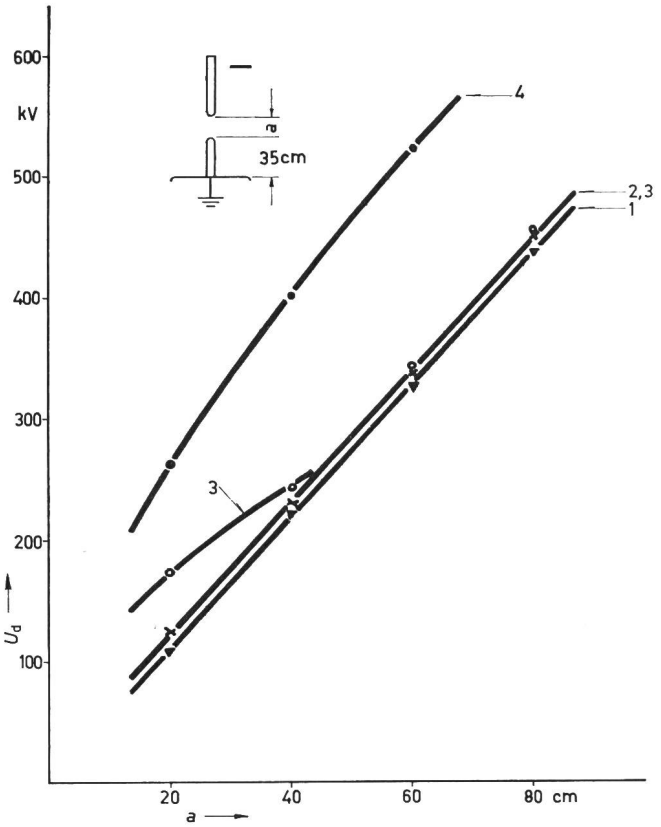

Fig. 17
Tension disruptive négative $(U_d)_-$ de la disposition barre-barre pour quatre électrodes terminales à barres
a distance explosive; *1* pointe à 30°; *2* hémisphère de 2 cm; *3* sphère de 5 cm; *4* sphère de 15 cm

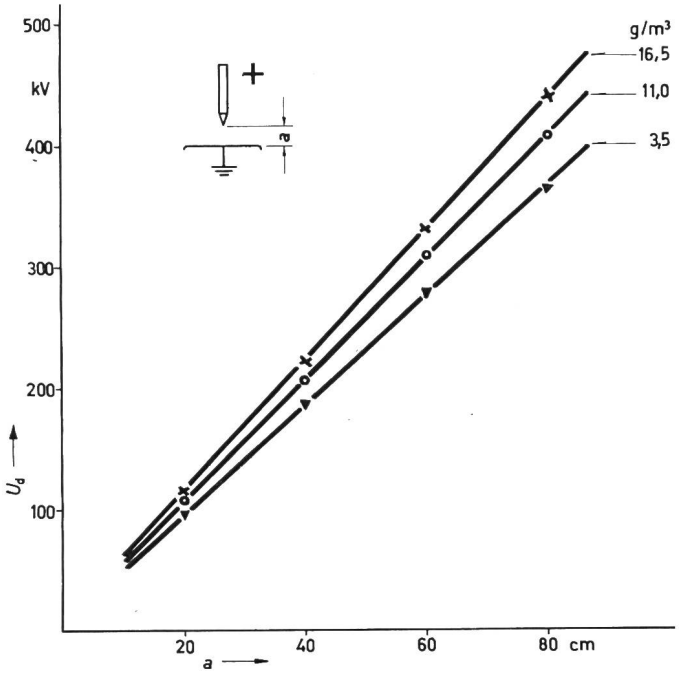

Fig. 18
Tension disruptive positive U_d de la disposition barre-plaque en fonction de la distance explosive a
Barre terminée par une pointe à 30°
Paramètre: humidité atmosphérique absolue φ_a; humidité atmosphérique relative $\delta = 1$; température $\vartheta = 20$ °C

valeurs se rapportant aux conditions normales; à 16,5 g/m³ elle les dépasse par contre d'env. 8 %.

Dans l'électrode terminée par une hémisphère de 2 cm (fig. 19), la rupture est amorcée à une humidité de 16,5 g/m³, comme d'ailleurs toujours à φ_{a0} par une décharge en aigrette. On y retrouve en somme les mêmes conditions qu'à la fig. 18. A 3,5 g/m³ et des distances de $a < 60$ cm se forme d'abord une décharge stable à effluve qui précède la rupture. A $a = 80$ cm on observe avant la rupture complète la transformation en une décharge en aigrette. La fonction de la tension

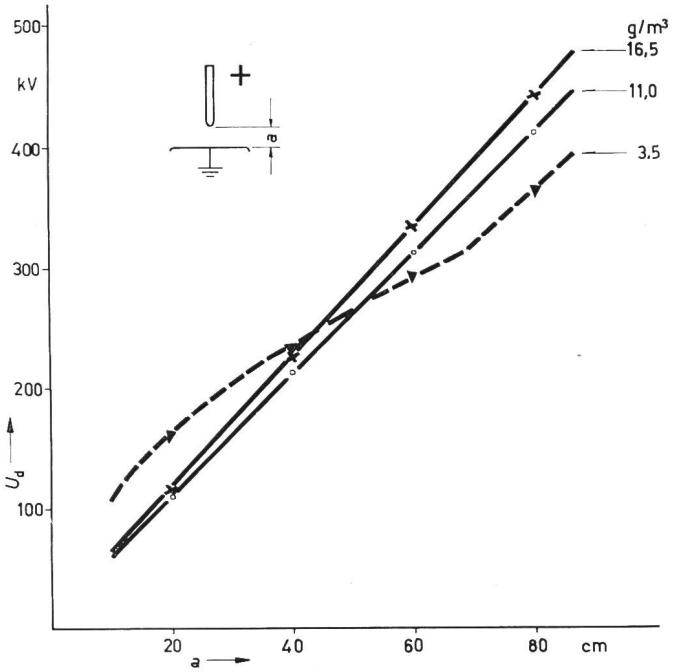

Fig. 19
Similaire à la fig. 18, mais avec barre terminée par une hémisphère de 2 cm
Indications détaillées voir fig. 18

disruptive s'oriente dans ce cas à partir d'un écartement des électrodes d'env. 70 cm vers le tracé rectiligne. Si la rupture est précédée d'une décharge en effluve, la rigidité diélectrique est sensiblement plus élevée que dans la décharge en aigrette. La fig. 19 peut être considérée à ce point de vue comme caractéristique en illustrant à quel point la forme de la prédécharge est décisive au sujet de la hauteur de la tension disruptive.

On sait que dans les dispositions homogènes, ou sensiblement homogènes, l'humidité de l'air n'exerce qu'une faible influence sur la tension disruptive. Aux barres terminées par des sphères de 15 cm, la rupture s'effectue jusqu'à 60 cm de distance sans prédécharges nettement décelables. Partant de ce fait, une modification de l'humidité de l'air devrait ainsi demeurer dans ce domaine sans grande influence sur U_d; ce n'est qu'à partir du développement des aigrettes que l'on peut constater dans ce cas une dépendance marquée à l'égard de l'humidité. Les courbes de la fig. 20 confirment du reste

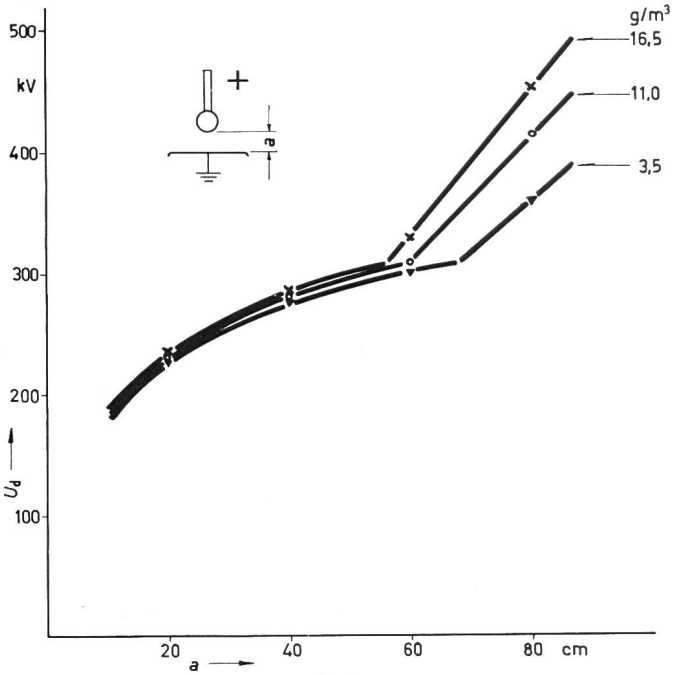

Fig. 20
Similaire à la fig. 18, mais avec barre terminée par une sphère de 15 cm
Indications détaillées voir fig. 18

ces considérations. Dans le paramètre s'étendant jusqu'à l'amorçage des prédécharges on retrouve trois courbes étroitement liées. Une influence de l'humidité est bien entendu présente, mais elle sera tout juste décélable. Dès que les aigrettes se manifestent, l'influence de l'humidité de l'air sera aussi accentuée que dans les autres électrodes. Afin de tenir compte de l'influence de l'humidité il est de ce fait important de savoir, si la tension initiale et la tension disruptive coïncident, ou si la rupture est précédée de prédécharges. Si la rupture se manifeste sous forme d'impulsions de décharges luminescentes, resp. par des décharges en aigrette, la formule empirique du calcul de la tension disruptive demeure valable même à des degrés d'humidité d'air différenciés.

Tel qu'on le constate à la fig. 18, la constante A ne sera que faiblement influencée par une variation de l'humidité absolue. En négligeant cette faible variation, la constante B sera seule affectée par l'humidité. La mesure dans laquelle B sera influencée dans le domaine intéressant au point de vue technique est illustrée par la fig. 21. Ce diagramme représente pour toutes

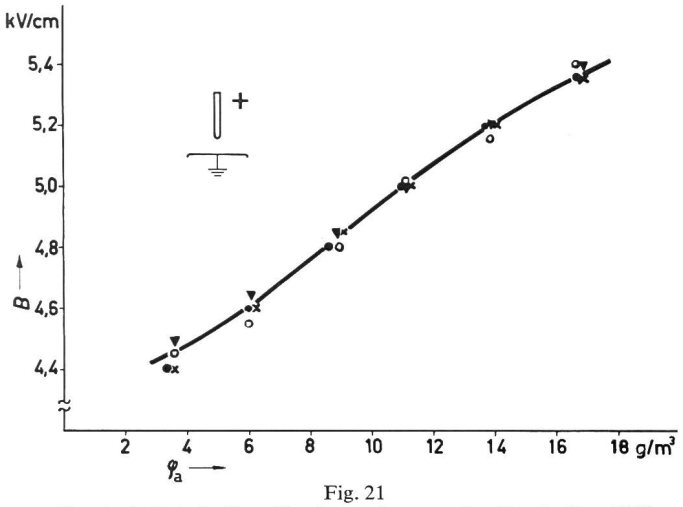

Fig. 21
Constante B de la disposition barre-plaque en fonction de l'humidité atmosphérique absolue φ_a
densité relative de l'air $\delta = 1$; température $\vartheta = 20\,^{\circ}C$
▼ pointe à 30°; x hémisphère de 2 cm; o sphère de 5 cm; ● sphère de 15 cm

les 4 électrodes terminales toutes les valeurs de B, déterminées à six degrés d'humidité et à une température de 20 °C. Vu que l'on n'a retenu que les charges moyennes où la rupture fut précédée de prédécharges à impulsions, la forme des électrodes ne joue pratiquement aucun rôle. D'après ces résultats, la constante B monte d'env. 4,45 kV/cm (pour $\varphi_a = 3{,}5$ g/m³) jusqu'à environ 5,35 kV/cm (pour $\varphi_a = 16{,}5$ g/m³). Cette différence parfaitement appréciable d'approchant 20 % prouve bien la nécessité de bien connaître la relation existante entre la tension disruptive et l'humidité de l'air.

L'influence exercée par l'humidité atmosphérique sur la tension disruptive barre-plaque est illustrée par la fig. 22. Dans ce diagramme, les tensions disruptives de la pointe à 30°, ainsi que de la sphère de 5 cm, sont représentées en fonction de la distance. De même que dans les figures 18...20, le paramètre est constitué par l'humidité absolue. Les deux diagrammes prouvent que la tension disruptive ne sera dans ce cas nullement influenceé par l'humidité de l'air. Une dépendance de φ_a n'est décelée ni dans le domaine de la décharge en aigrette, ni dans celui de la décharge en ronce (pointe à 30°). Les valeurs moyennes inscrites (chaque fois tirées de 20 valeurs individuelles) sont partiellement concentrées, ou partiellement disséminées, sans présenter aucune tendance uniforme.

La fig. 23 précise que les valeurs disruptives des divers degrés d'humidité ne présentent que des déviations purement accidentelles. On y confronta les pourcentages des domaines de fiabilité pour l'hémisphère de 2 cm et la sphère de 5 cm pour $a = 40$ cm aux degrés d'humidité examinés. La valeur moyenne de six séries de mesures fut dans ce cas choisie comme valeur de référence. L'illustration laisse reconnaître aux deux formes d'électrodes un recouvrement mutuel des domaines de fiabilité. Ce résultat fut du reste confirmé aux autres distances et aux autres formes d'électrodes. Avec une probabilité d'erreur de 5 % on peut en déduire d'après les lois statistiques que la tension disruptive négative de l'éclateur barre-plaque demeure indépendante de l'humidité atmosphérique.

Dans la disposition barre-barre terminée par des hémisphères de 2 cm, la tension disruptive est représentée à la fig. 24 en fonction de la distance avec le paramètre φ_a. Les deux diagrammes accusent, tant à la polarité positive que négative, une influence sensible causée par l'humidité de l'air. Les déviations — exprimées en pourcents et reportées à des valeurs de tensions à 11 g/m³ — présentent en somme le même ordre de grandeur que la disposition positive barre-plaque. La tracé rectiligne de la fonction disruptive demeure dans ce cas conservé même aux faibles valeurs d'humidité.

Dans le cadre nécessairement restreint de cet exposé, nous renoncerons à une étude plus détaillée de l'influence exercée par l'humidité, en particulier par l'humidité absolue, et à l'établissement de facteurs de correction. En vue d'une considération globale de l'influence exercée par l'humidité, indiquons néanmoins, qu'aux humidités absolues de 5...12 g/m³, ce coefficient de correction peut être approché par une droite. Dans ce paramètre, l'accroissement moyen de la tension disruptive atteint 1,5 % par augmentation d'humidité de 1 g/m³.

6. Comparaison avec les recherches connues jusqu'à présent

Après l'explication et la discussion de nos propres recherches, nous allons à présent procéder à une comparaison

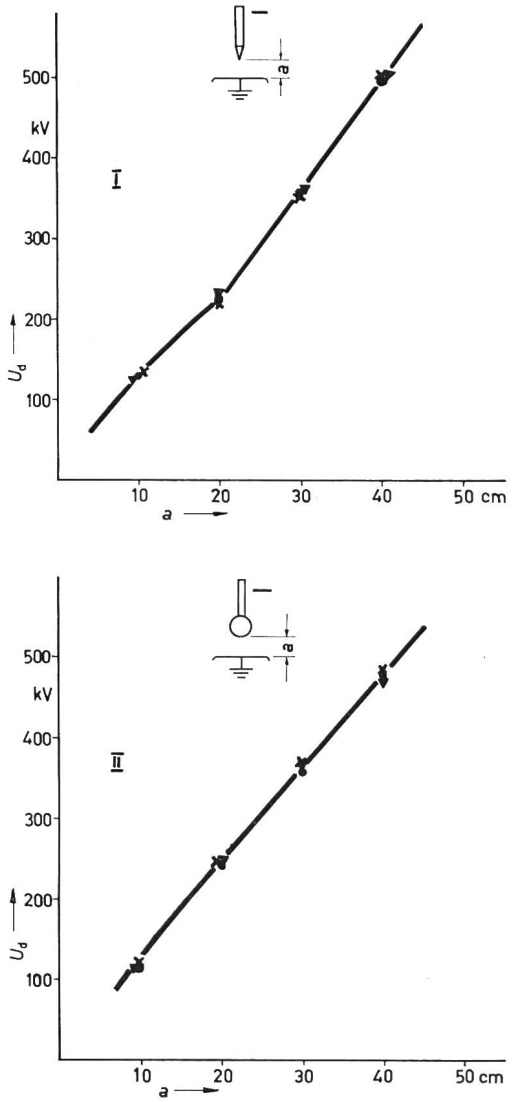

Fig. 22
Tension disruptive négative $(U_d)_-$ de la disposition barre-plaque en fonction de la distance explosive a
I barre terminée par une pointe à 30°; *II* barre terminée par une sphère de 5 cm
Paramètre: humidité atmosphérique absolue φ_a: ▼ 16,5 g/m³; x 11,0 g/m³; ● 3,5 g/m³
Indications détaillées voir fig. 18

Comparaison des constantes A et B dans la disposition barre-plaque Tableau IV

Polarité	Résultats d'après	Forme des électrodes	Humidité atmosphér.	Domaine de validité		A	B
				Tension	Distance		
			g/m³	kV	m	kV	kV/cm
négative	*Rabinovitch*	inconnue	inconnue	250...1300	0,3...1,5	0	9,0
	Udo/Watanabe	12,5 × 12,5 mm «obtus»	5...8	400...800	0,3...0,7	80	10,3
	Tableau III	pointe 30°	11	500...1200	0,5...1,2	165	9,2
positive	*Rabinovitch*	inconnue	inconnue	0...1200	0...2,5	0	4,8
	Udo/Watanabe	12,5 × 12,5 mm «obtus»	5...8	200...800	0,5...1,7	—25	4,85
	Tableau I	pointe 30°	11	100...1200	0,2...2,5	≈10	5,0
tension alternative	*Jacottet*	«pointe»	11	200...600	0,4...1,2	0	5,0

avec les résultats obtenus par les autres chercheurs. Tel que nous l'avions déjà mentionné, la proportionnalité entre la distance des électrodes et la tension disruptive lors des sollicitations à tension continue est déjà connue par des mesures précédentes [6; 12; 13]. Une comparaison exacte demeure cependant impossible par suite du manque de certaines indications, resp. par suite d'indications incomplètes relatives aux divers paramètres d'essai.

Les constantes A et B correspondent à l'équation:

$$U_d = A + Ba$$

mais peuvent être déduites des feuilles de courbes des divers auteurs. Les données ainsi obtenues sont confrontées aux tableaux IV et V à nos propres résultats.

Pour la disposition barre-plaque (tableau IV) et une électrode à barre négative — cas particulier dans lequel l'humidité n'exerce aucune influence — on ne constate que de faibles déviations entre les divers facteurs B. Les différences se rapportant à la valeur de la constante A peuvent, après une enquête sur les influences exercées par la forme des électrodes, être imputées aux différentes électrodes à barres (voir fig. 14 et 15).

Compte tenu de la dépendance du facteur B de l'humidité (voir fig. 21), on en déduit à la polarité positive une bonne coïncidence avec nos propres résultats. D'après *Jacottet* et *Weicker* [14], la proportionnalité entre la tension disruptive (valeur de crête) et l'écartement des électrodes lors d'une sollicitation à tension alternative ne se manifeste dans la disposition barre-plaque que dans la zone de 0,4...1,2 m. La constante B, reportée aux conditions normales, atteint alors 5 kV/cm et sera de ce fait indentique à la valeur déterminée par nos propres mesures en tension continue positive.

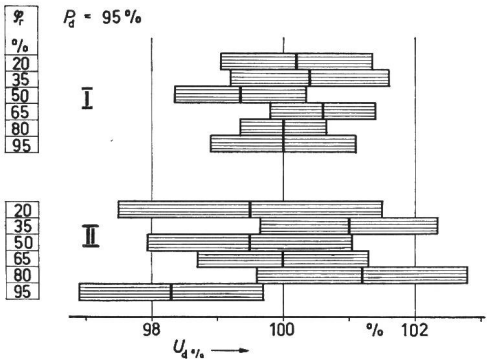

Fig. 23
Pourcentage du domaine de fiabilité de la tension disruptive négative U_d % de la disposition barre-plaque pour 6 degrés différents d'humidité
I barre terminée par une hémisphère de 2 cm; *II* barre terminée par une sphère de 5 cm
Distance explosive a = 40 cm; température ϑ = 20 °C; densité relative de l'air δ = 1; P_d sécurité statistique bilatérale
Paramètre: humidité atmosphérique relative φ_r

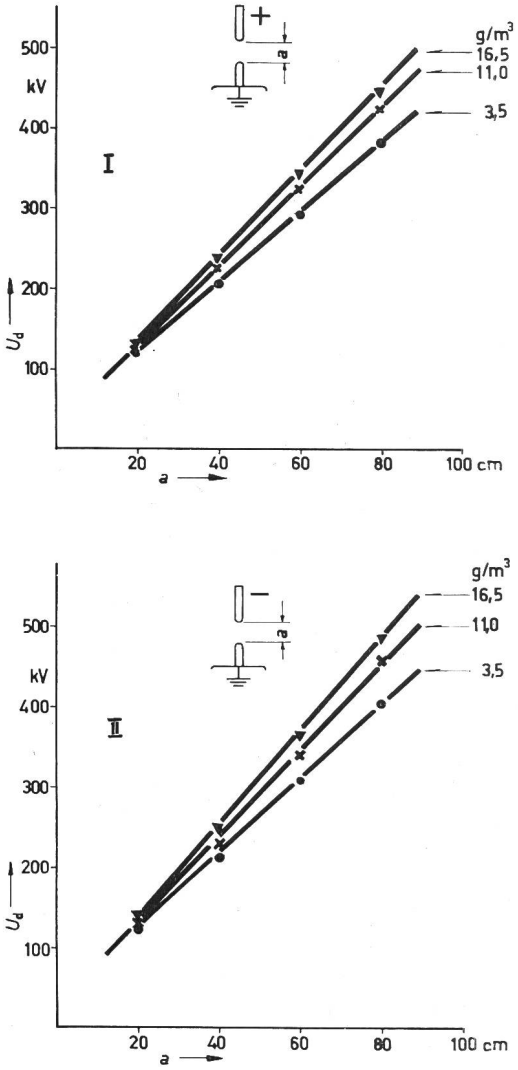

Fig. 24
Tension disruptive U_d de la disposition barre-barre en fonction de la distance explosive a
Barre terminée par une hémisphère de 2 cm
I à la polarité positive; *II* à la polarité négative densité relative de l'air δ = 1; température ϑ = 20 °C
Paramètre: humidité atmosphérique absolue φ_a

Comparaison des constantes A et B dans la disposition barre-barre Tableau V

Polarité	Résultats d'après	Forme des électrodes	Humidité atmosphér.	Domaine de validité		*A*	*B*
				Tension	Distance		
			g/m³	kV	m	kV	kV/cm
négative	*Hill*	12,5 × 12,5 mm «obtus»	inconnue	0...800	0...1,6	0	5,05
	Udo/Watanabe	12,5 × 12,5 mm «obtus»	4...9	300...800	0,7...1,8	—50	5,0
	Tableau II	hémisph. 2 cm	11	100...1250	0,2...2,5	≈15	5,1
positive	*Rabinovitch*	inconnue	inconnue	0...1300	0...2,4	0	5,4
	Hill	12,5 × 12,5 mm «obtus»	inconnue	0...800	0...1,6	0	5,1
	Udo/Watanabe	12,5 × 12,5 mm «obtus»	4...9	300...900	0,7...1,8	—25	5,0
	Tableau II	hémisph. 2 cm	11	100...1250	0,2...2,5	20	5,1
tension alternative	*Jacottet*	«pointe»	11	200...1000	0,4...2,0	0	5,1

Pour la disposition barre-barre (tableau V), on constate aux deux polarités une étonnante concordance de tous les résultats. Ce classement indique — tel que l'ont prouvé nos propres recherches — que la forme de l'électrode à barre n'exerce dans cet éclateur pratiquement aucune influence à des distances plus étendues. La disposition barre-barre ne manifeste en outre dans aucun de ces travaux une dépendance marquée à l'égard de la polarité.

On peut déduire, en résumé de cette confrontation, que la rigidité diélectrique-limite moyenne de 5 kV/cm est également confirmée par d'autres auteurs et qu'elle servira généralement jusqu'aux distances de 2,5 m de directive lors des questions relatives au dimensionnement.

7. Remarque finale

Le présent travail fut réalisé à l'Institut de haute tension et de la technique des installations de l'Ecole technique supérieure de Munich dans le cadre du programme relatif à la «Transmission à courant continu à haute tension» de la Deutsche Forschungsgemeinschaft.

Bibliographie

[1] *L. Lebrecht:* Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ). Deutsche Forschungsgemeinschaft, Forschungsbericht 9. Wiesbaden, Franz Steiner Verlag, 1966.

[2] *400-kV-Forschungsgemeinschaft:* Energieübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom. Bericht Nr. 20. Heidelberg, 1962.

[3] High Voltage DC Power Transmission Projects in Commission or under Construction. Direct Current 12(1967).

[4] Essais à haute tension. CEI-Publication 60, deuxième édition. Bureau centrale de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève 1962.

[5] Erzeugung und Messung von Hochspannungen. Teil 1: Bestimmungen für die Erzeugung und Anwendung von Wechsel- und Gleichspannungen für Prüfzwecke. VDE-Vorschrift 0433 Teil 1/1.66.

[6] *H. L. Hill:* The BPA EHV-DC insulation coordination tests. Bonneville Power Administration, Interim Report Nr. 302 (1965).

[7] *H. J. Henning* und *R. Wartmann:* Statistische Auswertung im Wahrscheinlichkeitsnetz: Kleiner Stichprobenumfang und Zufallsstreubereich. Zeitschrift für die gesamte Textilindustrie 60(1958), p. 19...24.

[8] *H. Klein:* Über die Streugrenzen statistischer Verteilungskurven. Teil 1: Mathematische Grundlagen. Mitteilungsblatt für mathematische Statistik 6(1954), p. 140...149.

[9] *W. O. Schumann:* Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Theoretische Grundlagen und Anwendung. Berlin, Springer, 1923.

[10] Erzeugung und Messung von Höchstspannungen. Teil 2: Regeln für Spannungsmessungen mit einpolig geerdeten Kugelfunkenstrecken. VDE-Vorschrift 0433 Teil 2/8.61.

[11] *A. Schwaiger:* Über elektrische Entladungen in Luft. ETZ–A 75(1954), p. 293...299.

[12] *J. Rabinovitch:* Transport d'énergie en courant continu à très haute tension. Discussion aux rapports Nos 407 et 417. CIGRE 1956, Tome I, p. 762...764.

[13] *T. Udo* and *Y. Watanabe:* DC high-voltage sparkover characteristics of gaps and insulator strings. IEEE Trans. power apparatus and systems 87(1968), p. 266...270.

[14] *P. Jacottet* und *W. Weicker:* Überschlag-Wechselspannungen und 50 %-Überschlag-Stoßspannungen von Stabfunkenstrecken. ETZ 61(1940), p. 565...566.

Adresse de l'auteur:

Dr. *E. Peschke,* ing., collaborateur scientifique à l'Institut de haute tension et de la technique des installations de la TH Munich, Arcisstrasse 21, D–8 Munich 2.