

## Recherches expérimentales sur la dispersion des tensions de contournement et d'amorçage d'isolateurs, éclateurs et parafoudres soumis à de fortes tensions de choc

Par K. Berger, Zurich

621.315.62 : 621.317.32.015.52

*Description et discussion des résultats de mesures, exécutées durant plusieurs années, de la dispersion des tensions de contournement et d'amorçage d'isolateurs, éclateurs et parafoudres soumis à de fortes tensions de choc. Dans le cas des isolateurs et des éclateurs, les valeurs de la tension de contournement ne présentent qu'une bande de dispersion de largeur modérée. Toutefois, les tensions d'amorçage des éclateurs à sphères sont anormalement élevées et présentent une très forte dispersion, surtout pour les chocs négatifs, à tel point que ces éclateurs ne paraissent pas convenir à la mesure de tensions de choc individuelles. Dans le cas des parafoudres de construction appropriée, la dispersion est la plus faible, mais uniquement lorsqu'ils sont très soigneusement protégés contre toute pénétration d'humidité.*

*Discussion des effets de la dispersion sur l'intervalle de tension exigé par la coordination de l'isolement et des parafoudres, entre le niveau de protection et le niveau d'isolement dans l'air, compte tenu de la différence des tensions de contournement d'isolateurs individuels et d'installations complètes.*

*Der Autor beschreibt und diskutiert die Resultate von mehrjährigen Messungen der Streuung von Überschlag- und Ansprechspannungen verschiedener Isolatoren, Funkenstrecken und Überspannungsableiter unter Stossbeanspruchung. Bei den Isolatoren und Funkenstrecken liegen die Werte der Überschlagspannung innert einem Streuband mässiger Breite. Bei den Kugelfunkenstrecken zeigen sich anomal hohe und sehr stark streuende Ansprechspannungen, insbesondere bei negativem Stoss, welche solche Funkenstrecken zur Messung einzelner Stoßspannungen als ungeeignet erscheinen lassen. Bei den Ableitern werden bei geeigneter Konstruktion die kleinsten Streuungen erreicht, dies jedoch nur bei ausserordentlich sorgfältigem Abschluss von jeglicher Luftfeuchtigkeit.*

*Die Auswirkungen der Streuung auf das von der Koordination von Isolation und Ableitern zu verlangende Spannungsintervall zwischen Schutzniveau und Luftniveau werden besprochen, wobei auch auf den Unterschied der Überschlagspannungen einzelner Isolatoren und ganzer Anlagen hingewiesen wird.*

### 1. Considérations générales

La question d'utiliser des éclateurs ou des parafoudres pour la mesure de la valeur de crête de brus-

port entre les valeurs individuelles de la tension d'amorçage sous tension de choc et la distance disruptive réglée d'éclateurs ou de parafoudres. Il

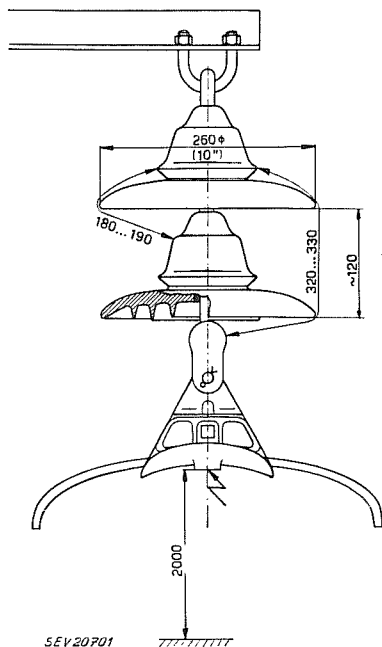


Fig. 1

Croquis côté de l'isolateur de suspension à deux éléments

ques surtensions dans des installations à haute tension a soulevé le problème de la précision du rap-

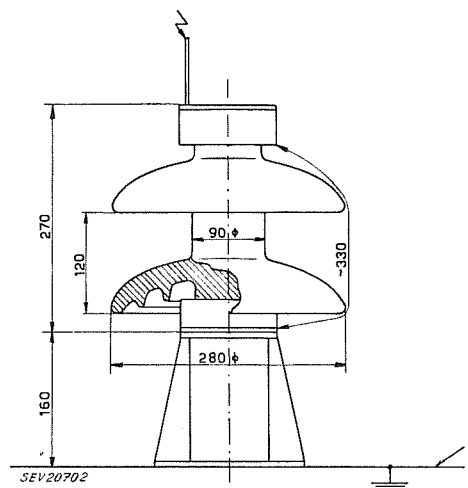


Fig. 2

Croquis côté de l'isolateur-support à fût massif  
g Grille

s'agissait également de savoir quelle est la dispersion des valeurs individuelles de la tension de contournement des isolateurs.

### 2. Objets soumis aux essais

Afin de répondre à ces questions, la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions

relatives à la haute tension (FKH) a entrepris deux séries d'essais, de décembre 1945 à février 1948 et d'avril 1949 à août 1951, durant lesquels la tension d'amorçage ou de contournement de parafoudres, éclateurs et isolateurs a été mesurée périodiquement.

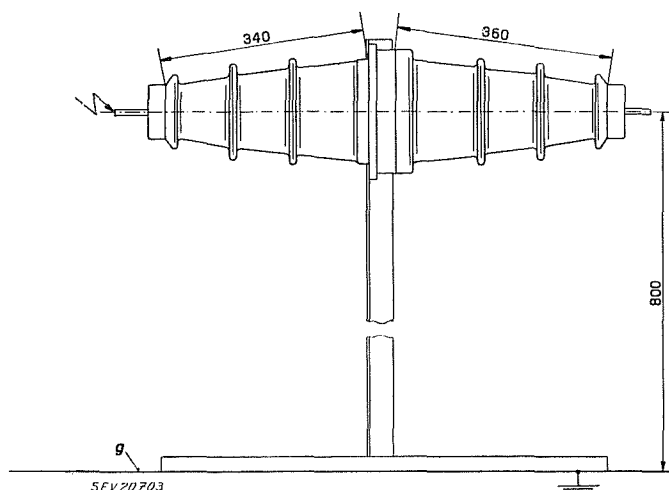


Fig. 3  
Croquis côté de la traversee pour montage intérieur  
g Grille

Les figures 1 à 6 montrent les objets essayés durant la première série d'essais. Il s'agissait des matériels suivants:

#### Isolateurs (Première série d'essais)

- A) Isolateur de suspension, comprenant deux éléments à capot et tige (fig. 1).
- B) Isolateur-support à fût massif, fabrication Norden (fig. 2).
- C) Traversée en porcelaine pour montage intérieur (fig. 3).

#### Eclateurs (Première série d'essais)

- A) Eclateur à sphères, à axe vertical, diamètre des sphères 250 mm, distance disruptive 60 mm (fig. 4), sphères chromées, nettoyées avant chaque mesure.

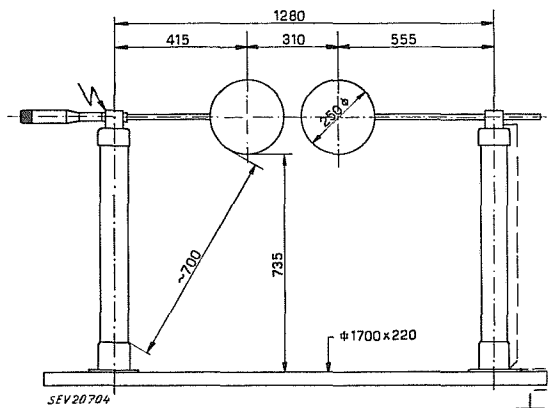


Fig. 4  
Croquis côté de l'éclateur à sphères  
Diamètre des sphères 250 mm

- B) Eclateur à sphères, à axe vertical, diamètre des sphères 125 mm, distance disruptive 60 mm (fig. 5), sphères chromées, non nettoyées durant toute la période de mesures.

- C) Eclateur à sphères, à axe horizontal, diamètre des sphères 125 mm, distance disruptive 60 mm (fig. 5), sphères nettoyées avant chaque mesure.

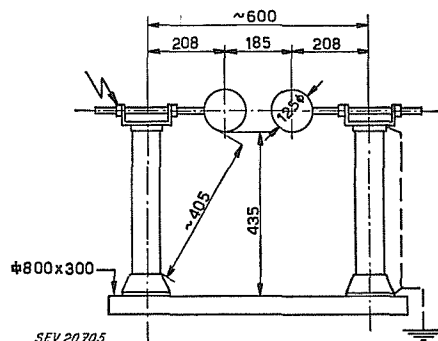


Fig. 5  
Croquis côté de l'éclateur à sphères  
Diamètre des sphères 125 mm

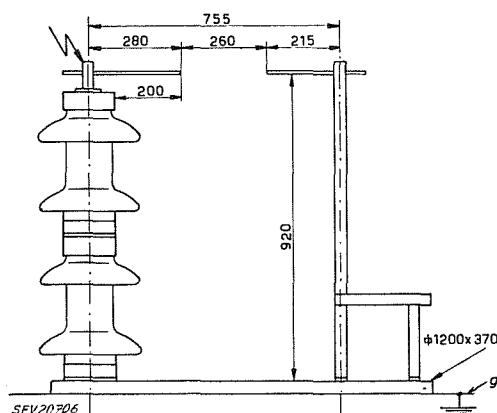


Fig. 6  
Croquis côté de l'éclateur à tiges  
(éclateur de coordination)  
g Grille

- D) Eclateur de coordination à tiges de fer à quatre pans 10 × 10 mm, distance disruptive 260 mm (fig. 6).

#### Parafoudres (Deuxième série d'essais)

Les résultats de la première série d'essais de parafoudres n'ayant pas été entièrement satisfaisants, une deuxième série d'essais fut entreprise avec du nouveau matériel. Il s'agissait des parafoudres suivants:

- A) 4 parafoudres normaux, tension nominale 45 kV, pouvoir d'écoulement 10 000 A, fabrication A.
- 1 parafoudre spécial, tension nominale 45 kV, pouvoir d'écoulement 10 000 A, fabrication A.
- B) 4 parafoudres normaux, tension nominale 45 kV, pouvoir d'écoulement 4000 A, fabrication B.
- 1 parafoudre spécial, tension nominale 45 kV, pouvoir d'écoulement 4000 A, fabrication B.
- C) 4 parafoudres normaux, tension nominale 45 kV, pouvoir d'écoulement 10 000 A, fabrication C.
- 1 parafoudre spécial, tension nominale 45 kV, pouvoir d'écoulement 10 000 A, fabrication C.

Tous ces parafoudres étaient de fabrication suisse. Les parafoudres «spéciaux» avaient été mis à la disposition de la FKH par les fabricants, pour des essais de durée de nouveaux modèles.

Parmi les quatre parafoudres normaux de chaque fabrication, deux furent maintenus constamment

sous une tension alternative d'environ 45 kV contre la terre. Les deux autres étaient conservés en plein air, sans tension, et soumis aux mêmes mesures que les deux parafoudres sous tension.

### 3. Disposition et méthode de mesure

L'examen de la dispersion des tensions de contournement nécessite une mesure souvent répétée

d'environ 80 kV/ $\mu$ s) et la valeur de contournement ou d'amorçage est déterminée avec un oscillographe cathodique. Afin de pouvoir reproduire la sollicitation en service et tenir compte de l'influence éventuelle de la tension appliquée en permanence, le matériel essayé a été soumis, par principe, à une tension alternative permanente à 50 Hz, à laquelle on pouvait superposer la tension d'essai de choc

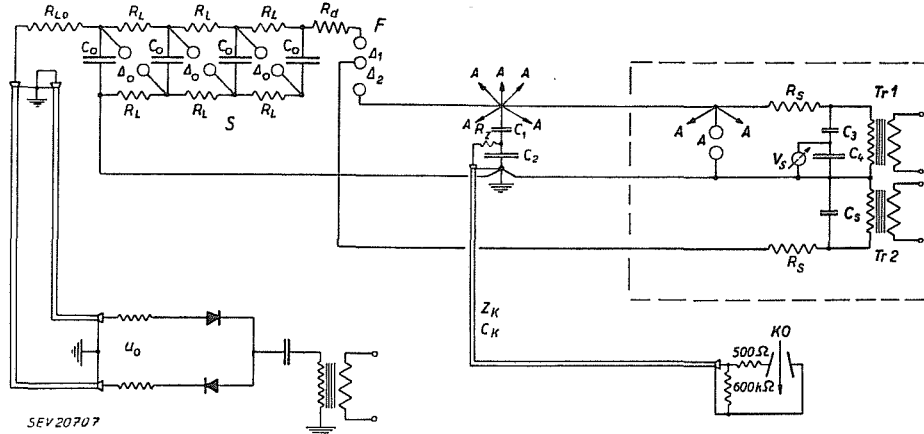


Fig. 7

Schéma de l'installation de choc et de mesure

|                      |                                                                                               |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| A                    | Parafoudres et éclateurs en essai (pour intérieur et plein air) avec tension d'amorçage $u_a$ |
| $C_0$                | Capacité échelonnée du générateur de choc S, avec tension de charge $u_0$ et $n$ étages       |
| $C_1, C_2$           | Diviseurs de tension capacitifs pour l'oscillographe                                          |
| $C_3, C_s$           | Diviseurs de tension capacitifs pour le voltmètre                                             |
| $C_s$                | Capacité de protection                                                                        |
| $C_K$                | Capacité du câble                                                                             |
| $\Delta_1, \Delta_2$ | Distances disruptives de l'éclateur d'amorçage F                                              |
| F                    | Éclateur d'amorçage et de synchronisation du générateur de choc S                             |

|               |                                                                                       |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| KO            | Oscillographe cathodique                                                              |
| $R_d$         | Résistance d'amortissement du circuit de choc, pour l'ajustage de la raideur du front |
| $R_L, R_{L0}$ | Résistances de charge                                                                 |
| $R_s$         | Résistances de protection pour les transformateurs d'essais                           |
| $R_Z$         | Résistance d'équilibrage                                                              |
| S             | Générateur de choc                                                                    |
| $Tr_1, Tr_2$  | Transformateurs d'essais pour 45 kV                                                   |
| $u_0$         | Tension de charge                                                                     |
| $V_s$         | Voltmètre                                                                             |
| $Z_K$         | Impédance caractéristique du câble de mesure                                          |

de ces tensions, avec un grand nombre de chocs individuels. Pour cette raison, la tension 50 % de contournement ne peut pas servir de critère, car il s'agit déjà d'une moyenne et non d'une valeur individuelle. On a donc eu recours à la méthode sui-

servant à la mesure, à un instant déterminé de la phase. Cet instant avait été fixé par des essais préliminaires et il fut maintenu pour toutes les mesures, de manière que celles-ci aient lieu dans des conditions identiques.

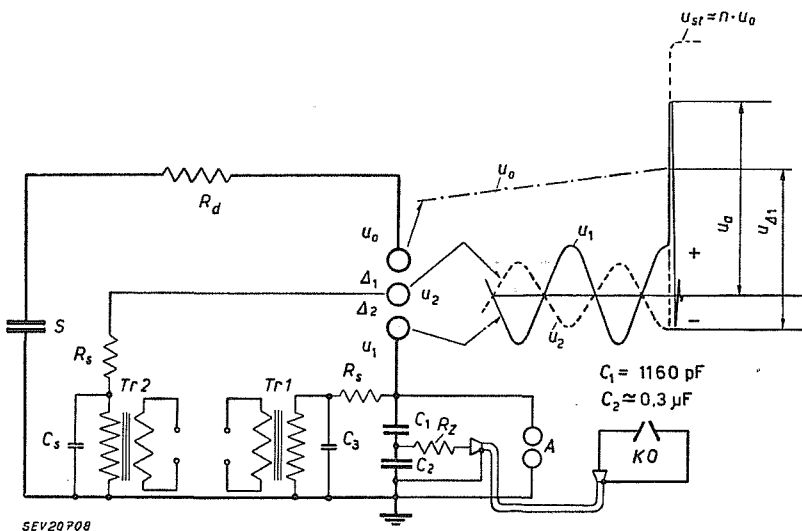


Fig. 8

Fonctionnement du couplage de choc selon la fig. 7

|                      |                                                                                                                                                               |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A                    | Parafoudres et éclateurs en essai, avec tension d'amorçage $u_a$                                                                                              |
| $C_1, C_2$           | Diviseurs de tension capacitifs pour l'oscillographe                                                                                                          |
| $C_3, C_s$           | Capacités de protection pour les transformateurs d'essais $Tr_1$ et $Tr_2$                                                                                    |
| $\Delta_1, \Delta_2$ | Distances disruptives de l'éclateur d'amorçage                                                                                                                |
| KO                   | Oscillographe cathodique                                                                                                                                      |
| $n$                  | Nombre d'étages du générateur de choc                                                                                                                         |
| $R_d$                | Résistance d'amortissement                                                                                                                                    |
| $R_s$                | Résistances de protection pour les transformateurs d'essais $Tr_1$ et $Tr_2$                                                                                  |
| $R_Z$                | Résistance d'équilibrage                                                                                                                                      |
| S                    | Générateur de choc                                                                                                                                            |
| $Tr_1$               | Transformateur pour l'alimentation permanente de l'objet en essai, avec tension alternative $u_1$ (50 Hz)                                                     |
| $Tr_2$               | Transformateur pour la synchronisation du choc à l'instant voulu de la phase de la tension alternative, donné par la position de la phase de la tension $u_2$ |
| $u_0$                | Tension de charge du générateur de choc S                                                                                                                     |
| $u_1$                | Tension alternative appliquée en permanence à l'objet en essai                                                                                                |
| $u_2$                | Tension alternative pour la synchronisation du choc                                                                                                           |
| $u_a$                | Tension d'amorçage de l'objet en essai A                                                                                                                      |
| $u_{A1}$             | Tension qui provoque le fonctionnement de $\Delta_1$ et par conséquent le déclenchement du choc                                                               |
| $u_{St}$             | Tension de choc                                                                                                                                               |

vante: Chaque isolateur et chaque éclateur à essayer est soumis à une tension de choc s'élevant d'une façon aussi uniforme que possible (raideur de front

Le schéma de la disposition de mesures est indiqué sur la fig. 7. La fig. 8 permet de se rendre compte du fonctionnement du couplage.

L'alimentation du transformateur *Tr. 2* avec des tensions  $u_2$  de différentes positions de phase permet de choisir l'instant d'amorçage convenable pour la tension  $u_1$ . L'amorçage à l'éclateur double *F* a toujours lieu lorsque la différence  $u_0 - u_2$  est maximum, c'est-à-dire pour des polarités opposées de la tension continue de charge  $u_0$  et de la tension alternative  $u_2$ . Lorsque, par exemple,  $u_2$  est choisie en opposition de phase avec  $u_1$ , le choc aura lieu dès que la valeur de crête de la tension alternative  $u_1$  a la même polarité que la tension de charge  $u_0$  ou la tension de choc  $n u_0$ . La distance disruptive  $\Delta_2$  est choisie suffisamment grande pour qu'elle ne soit franchie qu'après le fonctionnement de  $\Delta_1$ .

Les essais décrits ci-après ont toujours eu lieu avec un choc de même polarité que la valeur de crête de la tension alternative, à laquelle il est superposé. Avec ce couplage, la précision de la synchronisation n'est pas très grande, elle suffit néanmoins amplement pour ces essais, puisqu'il ne s'agit que d'éviter la dispersion des tensions d'amorçage qui se produirait si les phases étaient différentes.

Afin de demeurer dans la partie rectiligne du front de la tension, on a constamment utilisé une tension de choc de 500 kV. La mesure de la tension avec l'oscillographe s'est toujours faite avec un diviseur de tension capacitif très soigneusement construit et dont la précision et l'erreur de mesure étaient déterminées avec précision avant de procéder aux mesures de dispersion, en tenant également compte des erreurs introduites par le câble de re-

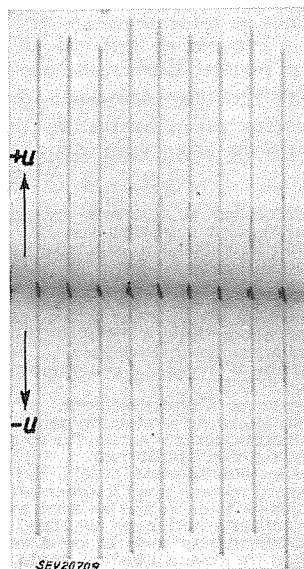


Fig. 9  
Exemple d'un oscillogramme des tensions de contournement de l'isolateur de suspension représenté sur la fig. 1  
9 chocs positifs  
et 9 chocs négatifs

tard d'environ 50 m (isolation par air avec perles de polystyrol, conducteur intérieur en cuivre de 5 mm de diamètre, conducteur extérieur en cuivre de 18 mm de diamètre, gaine de protection en plomb, fabrication de la S. A. des Câbleries de Brougg). Pour les deux séries d'essais, le diviseur de tension était exactement le même.

La méthode de détermination de la dispersion de chaque matériel est la suivante:

Le matériel pour montage à l'extérieur (isolateurs de suspension, isolateurs-supports, tous les parafoudres et les éclateurs à tiges) a été disposé

en plein air, tandis que le matériel pour installations intérieures (traversée, tous les éclateurs à sphères) le fut dans un garage de la station d'essais de Gösgen de la FKH. Un transformateur maintenait constamment ces objets sous une tension efficace d'environ 45 kV contre la terre. Pour la mesure de la tension de contournement ou d'amorçage au choc, les objets étaient successivement reliés par un fil de 3 à 5 m de longueur au diviseur de tension,

puis soumis au choc et mesurés. Lorsqu'il n'y avait pas particulièrement lieu de s'attendre à un écart, les mesures étaient exécutées toutes les 2 à 3 semaines, chaque objet étant soumis à 10 chocs positifs et à 10 chocs négatifs. Pour l'un des 10 chocs, l'oscillogramme était observé visuellement et, pour les 9 autres chocs, il était enregistré photographi-

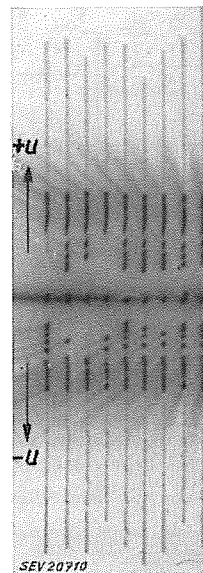


Fig. 10  
Exemple d'un oscillogramme des tensions d'amorçage d'un parafoudre  
9 chocs positifs et 9 chocs négatifs  
Les traits minces indiquent la grandeur des tensions d'amorçage, les traits épais la grandeur des tensions résiduelles

quement. L'ensemble de ces 20 chocs constitue une série de mesures. Afin d'économiser le papier photographique, on s'est bientôt contenté d'enregistrer ces oscillogrammes sans base de temps, c'est-à-dire uniquement avec la déviation verticale par la tension à déterminer. De la sorte, il était possible d'enregistrer l'un à côté de l'autre 9 chocs positifs et 9 chocs négatifs sur la largeur d'enregistrement (150 mm) de l'oscillographe (fig. 9). Chacun des 9 enregistrements est avancé de quelques millimètres sur le précédent, à l'aide d'une tension auxiliaire fixe. Les amplitudes des divers chocs peuvent ainsi être directement comparées entre elles et font apparaître distinctement la dispersion des valeurs individuelles.

Ce mode de procéder est admissible, car la raideur du front de la tension est presque uniquement déterminée par la capacité du diviseur de tension et par la résistance d'amortissement, lorsque la tension de charge  $u_0$  du générateur de choc est constante, de sorte que cette raideur est la même pour tous les objets et ne se modifie pas avec le temps.

Dans le cas des parafoudres, il est en outre possible de reconnaître la grandeur de la tension résiduelle, en observant le noircissement plus ou moins accentué du trait de l'oscillogramme, comme cela est visible sur la fig. 10. La tension d'amorçage est, en effet, très rapidement atteinte, après quoi la tension aux bornes du parafoudre tombe immédiatement jusqu'à la valeur résiduelle, où elle se maintient à peu près pendant toute la durée du courant de choc, du fait de la caractéristique non linéaire de la résistance du parafoudre. Ceci fait apparaître la tension résiduelle en trait épais,

tandis que la tension d'amorçage se révèle par un trait fin. On obtient ainsi un contrôle aisé de la constance du diviseur de tension, car on sait que la tension résiduelle ne varie que très peu, pour un

1. L'écart des *mesures individuelles* d'une polarité déterminée, par rapport à la *moyenne de l'ensemble de toutes les mesures* d'une série d'essais de deux ans.

2. L'écart entre les *mesures individuelles* d'une même série de mesures, effectuées le même jour, d'après les résul-

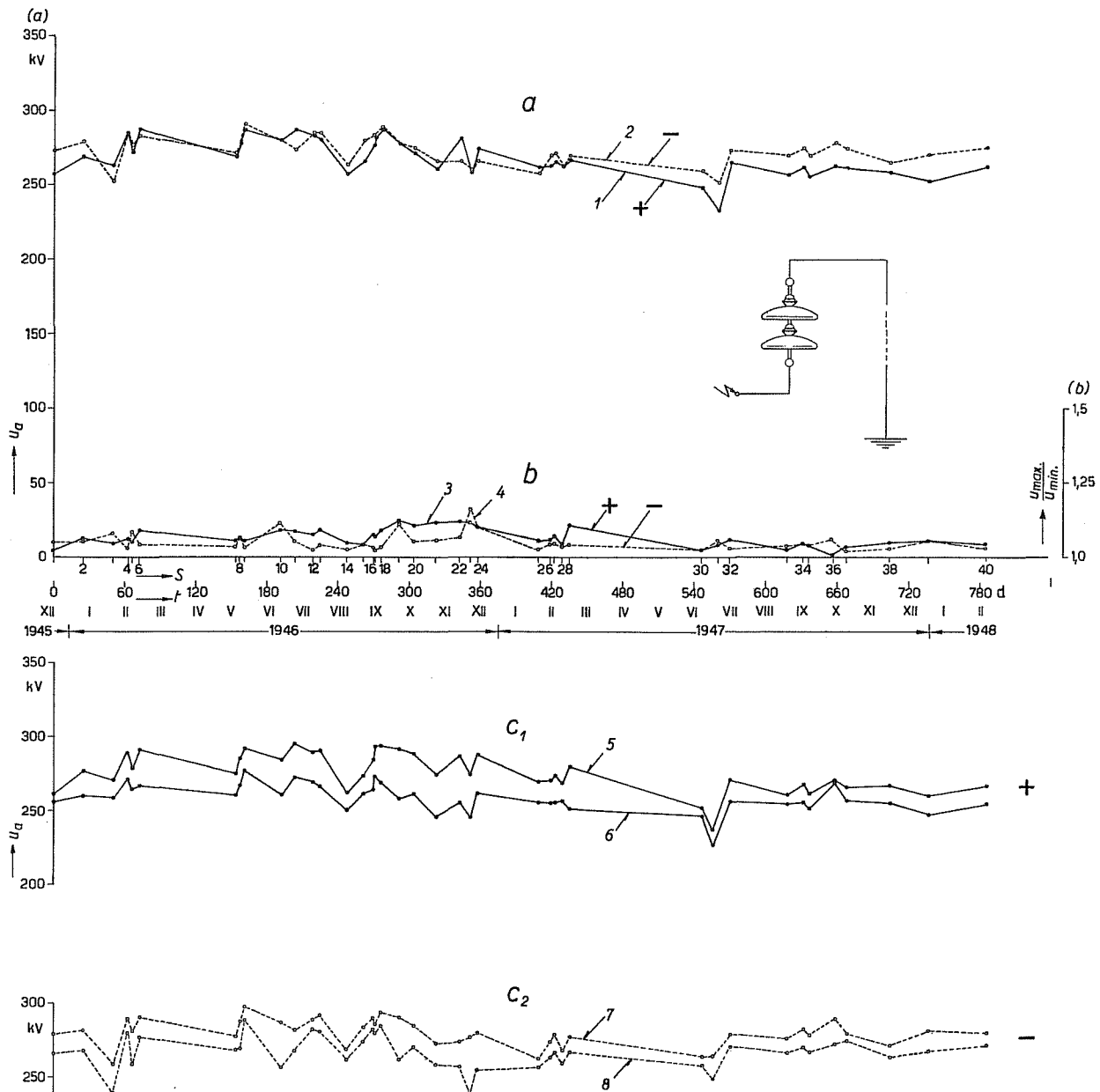


Fig. 11

Tension de contournement  $u$  de l'isolateur de suspension représenté sur la fig. 1, ramenée à la densité normale de l'air ( $p = 760 \text{ mm Hg}$ ,  $t = 20^\circ \text{C}$ )

a Moyennes positives et négatives de chaque série de mesures, courbes 1 et 2

b Rapport maximum/minimum de chaque série de mesures, courbes 3 et 4

c<sub>1</sub> Maxima et minima positifs de chaque série de mesures, courbes 5 et 6

c<sub>2</sub> Maxima et minima négatifs de chaque série de mesures, courbes 7 et 8

S Numéros des séries de mesures; t Temps

même courant de choc et une même température de la résistance. Les enregistrements montrent donc distinctement les variations de la tension d'amorçage, pour une tension résiduelle constante, lors d'une succession continue de chocs.

#### 4. Interprétation et représentation des résultats

Pour l'interprétation des résultats, il y a lieu tout d'abord de définir les diverses notions de la dispersion:

tats de 9 mesures positives et de 9 mesures négatives. Une indication grossière de cette dispersion est donnée, par exemple, par l'allure de la tension maximum et de la tension minimum mesurées au cours même d'une série ou par le rapport de ces deux valeurs. Il s'agit de la *dispersion par série de mesures*, pour chocs positifs et négatifs.

3. La variation des *moyennes des séries de mesures* pour une série d'essais de deux ans. Les moyennes peuvent être arithmétiques ou quadratiques; elles sont également calculées séparément pour les mesures avec chocs positifs et avec chocs négatifs.

Pour commencer, on considère les moyennes arithmétiques de chaque série de 9 mesures avec la même polarité et

l'on désigne par *dispersion des moyennes* d'une série d'essais de deux ans les écarts des valeurs moyennes des séries de mesures, par rapport à la moyenne générale. Pour cette dispersion, il est tenu compte des corrections appliquées internationalement aux tensions de contournement et se rapportant à la densité de l'air (hauteur barométrique et tempéra-

c) Variation des *valeurs maxima et minima* des diverses séries de mesures pour chocs positifs et négatifs, en fonction de la durée des essais.

Ces trois valeurs déterminantes pour la dispersion des moyennes (a) et pour la dispersion par

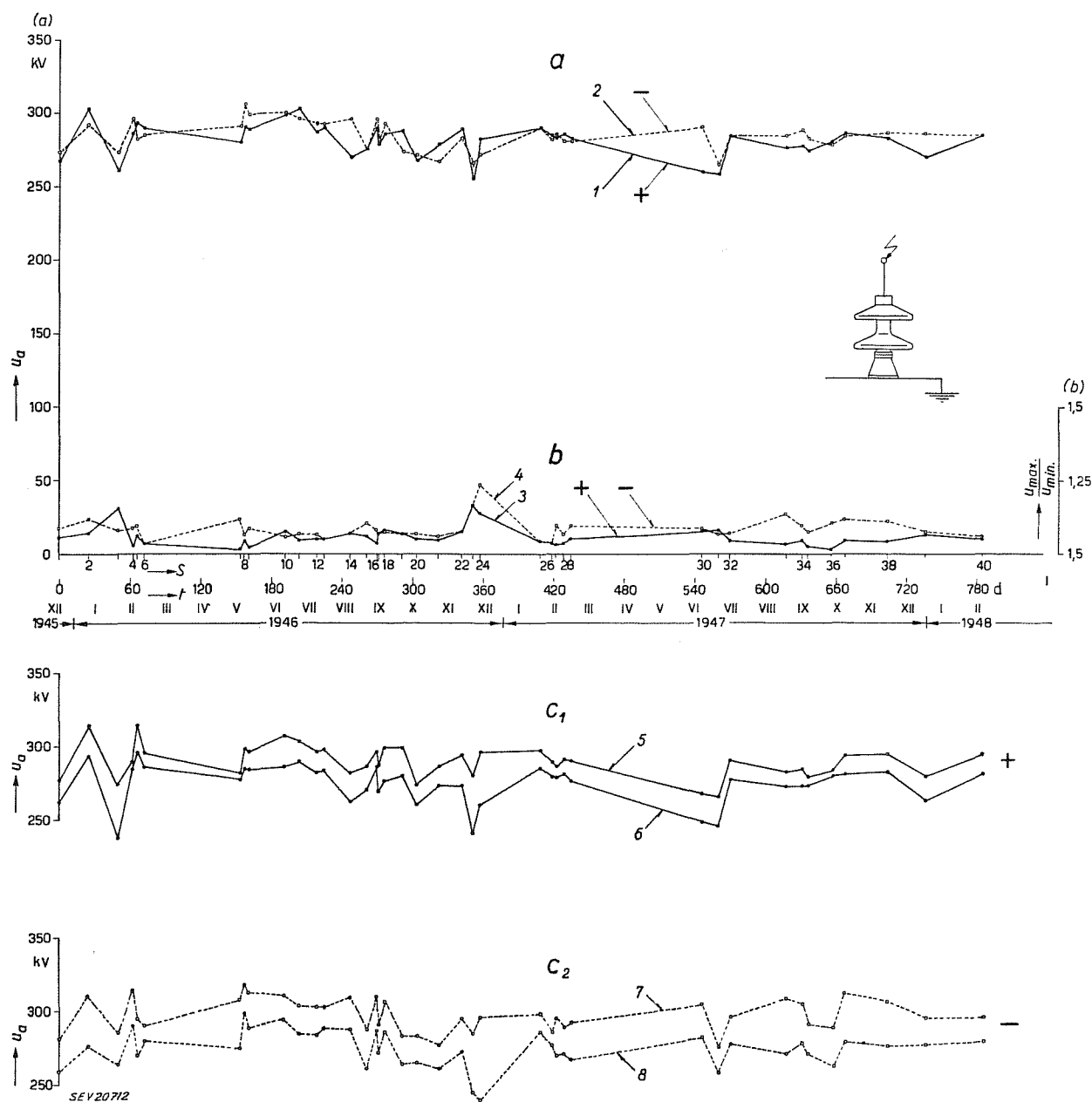


Fig. 12  
Tension de contournement de l'isolateur-support représenté sur la fig. 2  
a, b et c, comme pour la fig. 11

ture). Par contre, aucune correction n'a été apportée pour l'humidité variable de l'air, l'importance de ces corrections n'étant pas exactement connue.

Un premier mode de représentation des résultats est ainsi obtenu directement par les relevés suivants:

a) Variation des moyennes des séries de mesures, réduites à la densité normale de l'air, en fonction de la durée des essais (2 ans), pour chocs positifs et négatifs.

b) Variation du rapport entre la valeur maximum et la valeur minimum de chacune des diverses séries de mesures pour chocs positifs et négatifs, en fonction de la durée des essais.

série de mesures (b et c) sont groupées sur les figures suivantes:

Fig. 11 à 13 pour les trois isolateurs essayés, fig. 14 à 17 pour les éclateurs à tiges et à sphères essayés, fig. 18 à 23 pour les parafoudres à 45 kV essayés. La représentation c) ayant été abandonnée dans ce cas, il ne s'agit ici que des représentations a) et b).

## 5. Discussion des résultats

Les fig. 11 à 23 montrent tout d'abord que pour un peu plus de 600 oscillogrammes par objet essayé, effectués au cours de deux ans, les variations des ten-

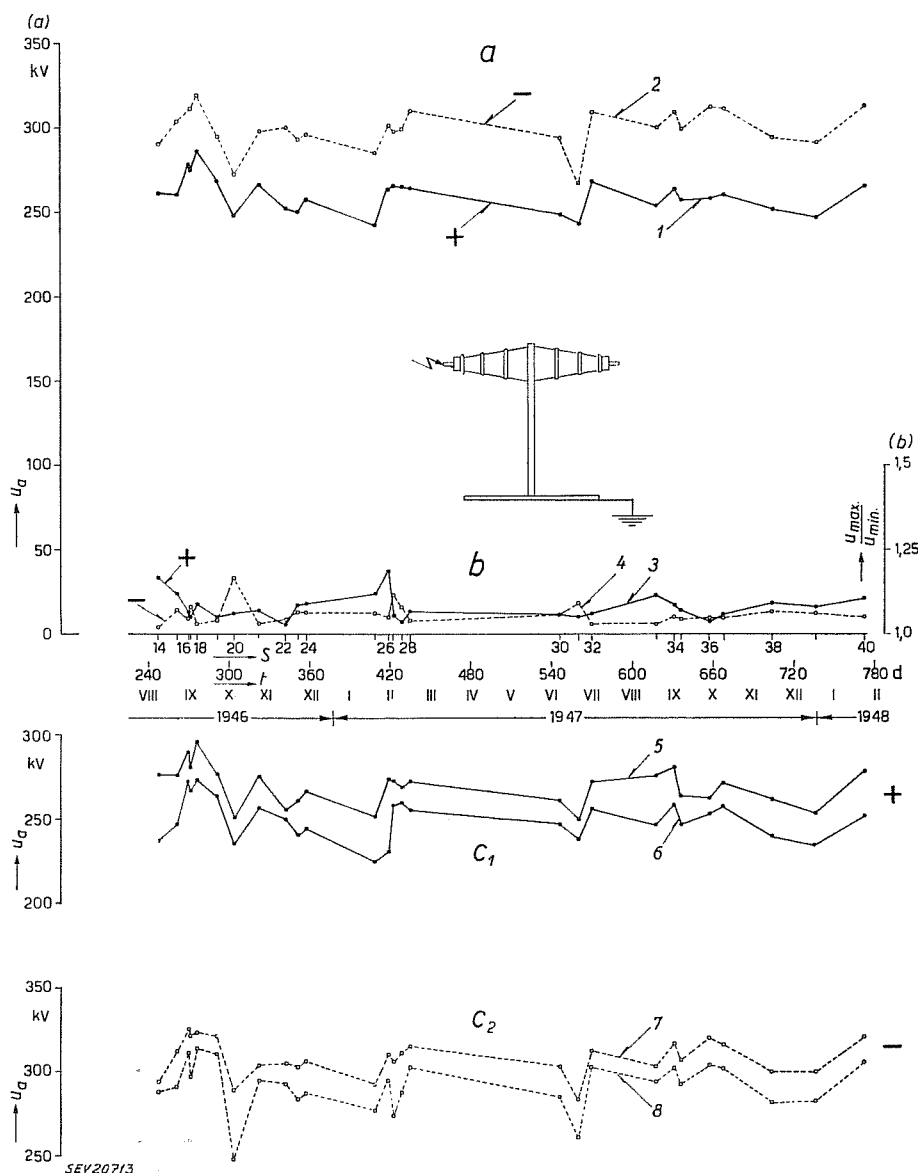
sions de contournement et d'amorçage sont considérables. Dans le cas du matériel pour installations intérieures, une des causes de dispersion est l'humidité variable de l'air; dans le cas du matériel pour l'extérieur, la dispersion provient en outre de la pluie, de la neige, de la rosée et du givre.

Pour déceler une relation éventuelle avec l'état de l'air, les tableaux I et II indiquent la température de l'air, la hauteur barométrique, le facteur de correction  $k$  qui en résulte durant la première série d'essais (isolateurs et éclateurs), ainsi que les humidités absolue et relative de l'air à l'extérieur et dans le local de mesure des matériels pour installations intérieures. Lorsque deux valeurs sont indiquées, la première concerne l'état de l'air au début de la série de mesures, l'autre à la fin de la série. Comme sur les fig. 11 à 23, on a choisi pour abscisse la date de la mesure et le numéro de la série de mesures. Enfin, les données météorologiques valables pour la Station d'essais de Gösgen, au début de chaque série de mesures de la première série d'essais, sont indiquées au tableau III.

Il n'a pas été procédé à l'étude de l'influence de l'humidité de l'air sur les tensions de contournement et d'amorçage, selon la théorie de la corrélation. L'observation des courbes ne permet pas de constater une telle corrélation.

Fig. 13  
Tension de contournement de la traversée représentée sur la fig. 3

a, b et c, comme pour la fig. 11



3) fig. 31 à 36 pour 2 parafoudres de chacune des 3 fabrications. Dans ce cas, on a indiqué l'abscisse de la moyenne  $M$  et des deux points de tension  $0,9 M$  et  $1,1 M$ , afin d'obtenir immédiatement une image de l'écart des tensions d'amorçage, en pour cent.

Des courbes 1) et 2), on déduit ce qui suit:

Selon la théorie de Gauss, on pouvait s'attendre à ce que la courbe de probabilité des diverses valeurs individuelles soit une *courbe en cloche* ma-

thématiquement bien définie<sup>1)</sup>. Une telle courbe est celle de la fonction

$$f(v) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{v-v_m}{\sqrt{2}s}\right)^2} \quad (1)$$

Or, les courbes de fréquence des valeurs mesurées a) et b) n'ont pas du tout une forme en cloche, ce qui signifie que les influences extérieures agissent systématiquement sur la tension d'amorçage ou de contournement, influences que nous n'avons pas pu déceler lors des essais.

1) Fig. 24 à 26 pour les 3 isolateurs (support, suspension et traversée);

2) fig. 27 à 30 pour les éclateurs à tiges et à sphères;

<sup>1)</sup> voir Morel, Ch.: Mathematische Statistik und Tarifwesen II. Bull. ASE t. 39(1948), n° 6, p. 161...174.

Chose remarquable, l'écart par rapport à la courbe en cloche idéale est le plus grand pour les éclateurs à sphères de 250 mm de diamètre et 60 mm de distance disruptive, lors de chocs de polarité négative. La courbe en fonction du temps correspondant à la fig. 14 montre déjà de grandes variations

teur à axe horizontal, dont les sphères étaient soigneusement nettoyées avant chaque mesure, montre une bande de dispersion sensiblement plus large (fig. 29) que le même éclateur à axe vertical, dont les sphères ne furent jamais nettoyées (fig. 28). Cette grande dispersion se produit surtout pour les

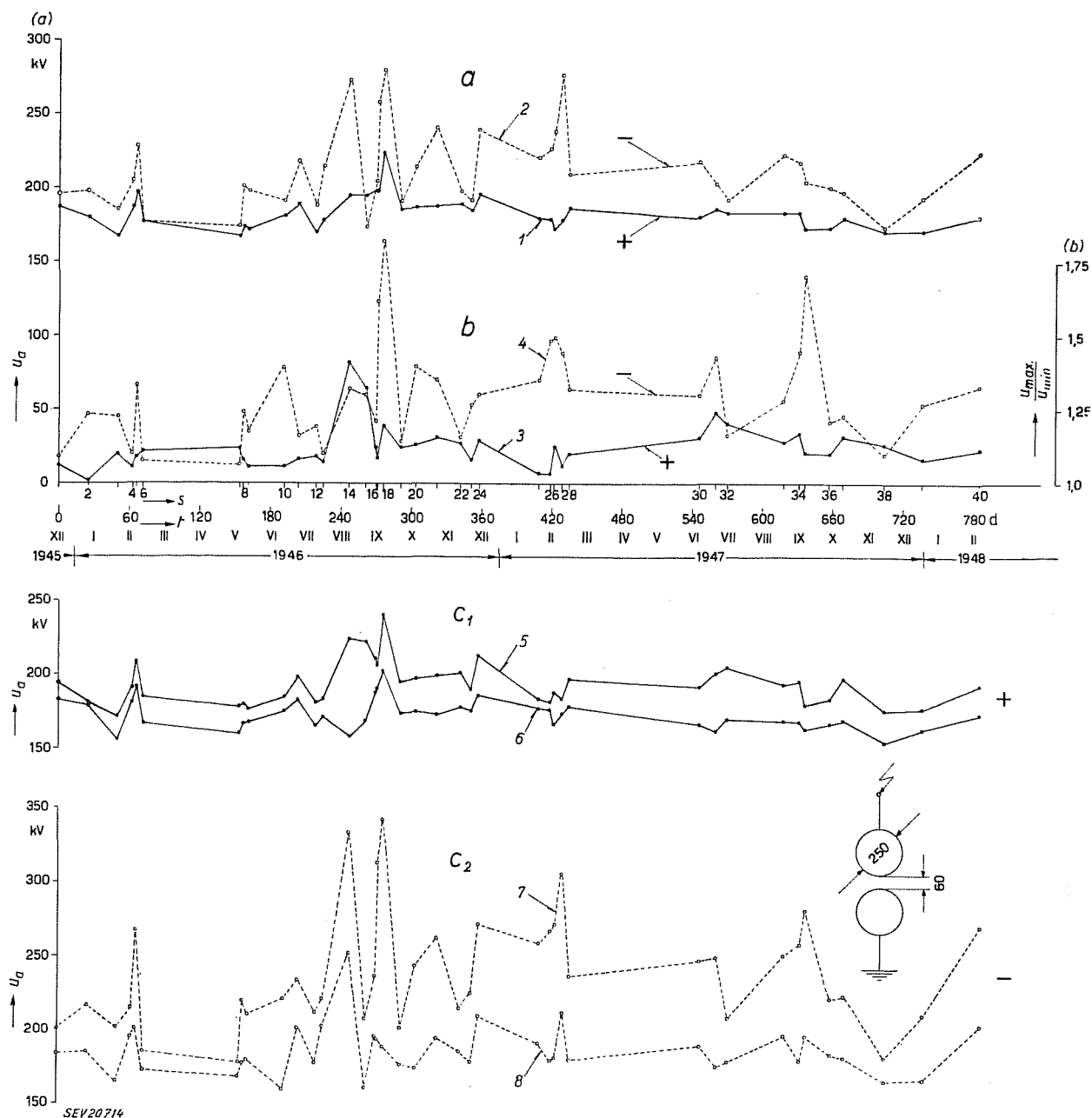


Fig. 14  
Tension d'amorçage de l'éclateur à sphères de 250 mm de diamètre représenté sur la fig. 4, ramenée à la densité normale de l'air (760 mm Hg, 20 °C)  
a, b et c, comme pour la fig. 11

de la tension d'amorçage de cet éclateur, ce qui prouve immédiatement qu'un tel éclateur à sphères est absolument inutilisable pour des mesures de chocs, bien qu'il fonctionne avec la distance disruptive la plus favorable.

En outre, on constate que la bande de dispersion des éclateurs à sphères de 250 et 125 mm de diamètre et de 60 mm de distance disruptive, pour chocs négatifs, est particulièrement large. L'écla-

tions de choc négatives. Les isolateurs, de même que l'éclateur à tiges, présentent les écarts habituels des tensions de contournement et d'amorçage selon la polarité, mais à part cela moins d'irrégularités que les sphères, exception faite pour l'isolateur de suspension, dont la courbe de fréquence positive est également très affaissée, ce qui provient d'une influence non déterminée.

Les courbes 3) montrent que la polarité n'a que



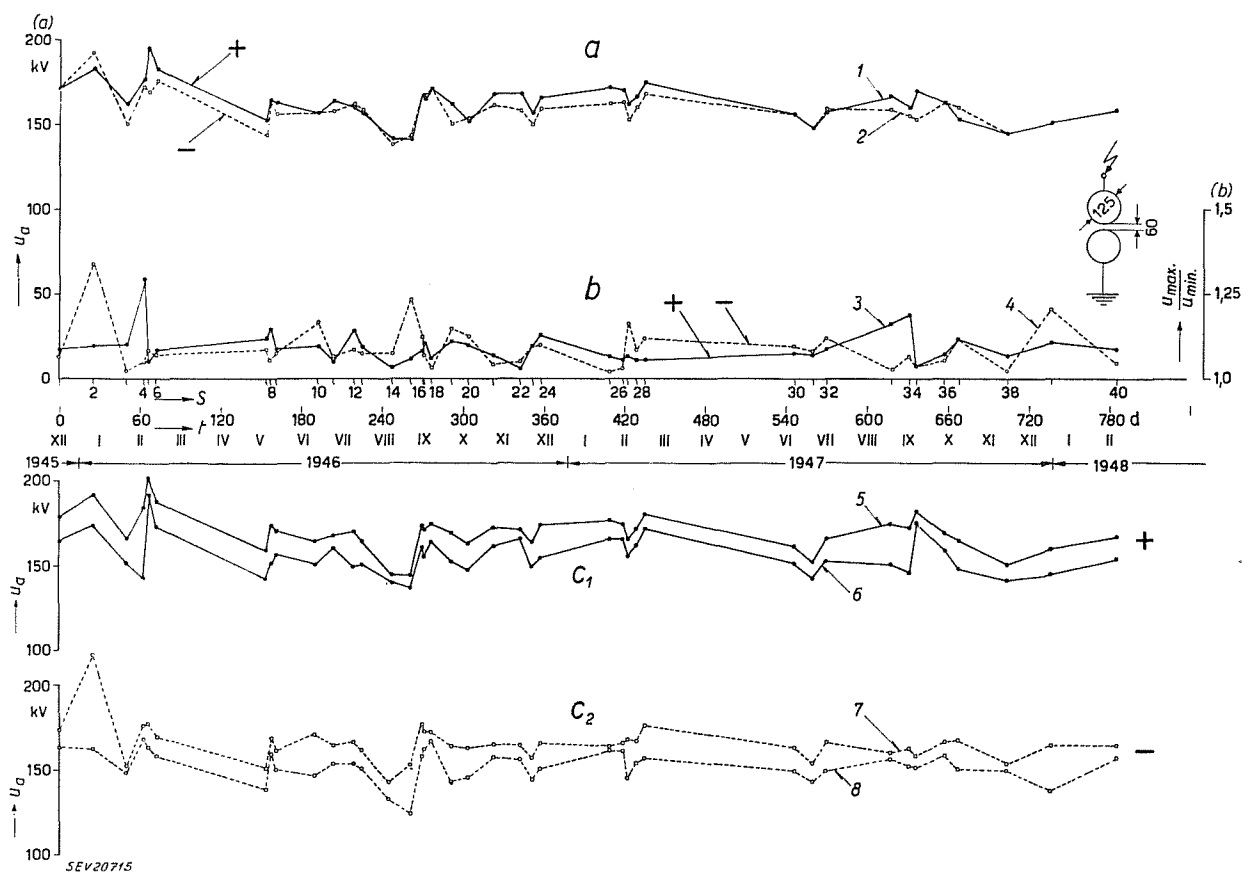


Fig. 15

Tension d'amorçage de l'éclateur à sphères de 125 mm de diamètre, à axe vertical, représenté sur la fig. 5, ramenée à la densité normale de l'air (760 mm Hg, 20 °C)  
a, b et c, comme pour la fig. 11

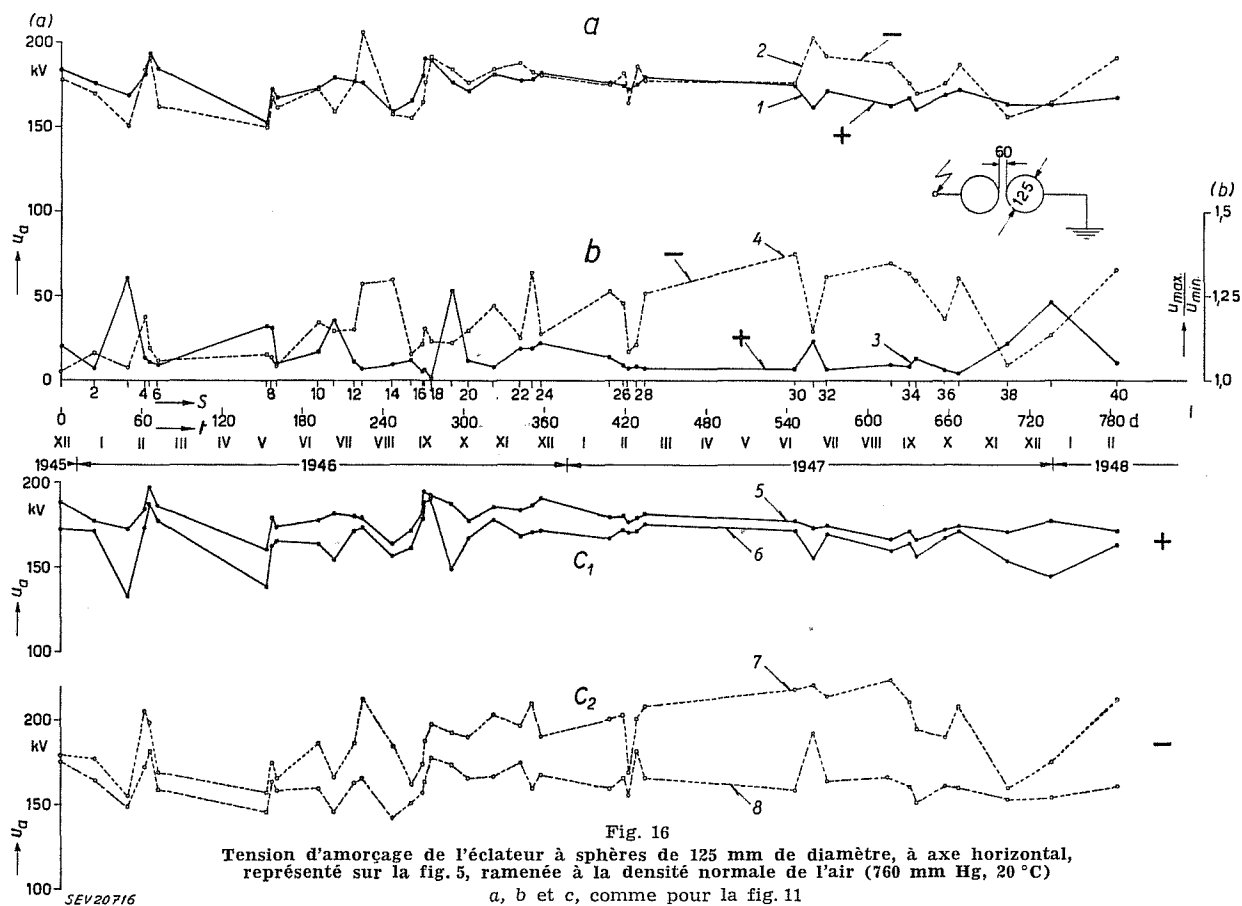


Fig. 16

Tension d'amorçage de l'éclateur à sphères de 125 mm de diamètre, à axe horizontal, représenté sur la fig. 5, ramenée à la densité normale de l'air (760 mm Hg, 20 °C)  
a, b et c, comme pour la fig. 11

Conditions météorologiques durant les essais. Pression et humidité de l'air. (Valables pour les matériels disposés en plein air.)

Tableau I

| Série<br>N° | Date des essais | Heures        | Conditions météorologiques durant les essais    | Température<br>de l'air<br>°C | Hauteur<br>barométrique<br>mm Hg | Facteur de<br>correction<br>k | Humidité de l'air |          | Remarques                                                                                        |
|-------------|-----------------|---------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |                 |               |                                                 |                               |                                  |                               | g/m³              | %        |                                                                                                  |
| 1           | 19 déc. 45      | 16.10...18.00 | Beau; puis brouillard. Faible vent d'ouest      | 2,5                           | 712                              | 1,0                           | 5,4               | 100      | Valables pour:<br>parafoudre<br>isolateur de suspension<br>isolateur-support<br>éclateur à tiges |
| 2           | 14 janv. 46     | 19.30...16.00 | Pluie; puis couvert. Fort vent d'ouest          | 7                             | 728                              | 1,005                         | 7,6               | 100      |                                                                                                  |
| 3           | 6 févr. 46      | 18.20...21.05 | Pluie. Fort vent du sud-ouest                   | 4,8                           | 729                              | 1,015                         | 6...6,5           | 95...100 |                                                                                                  |
| 4           | 19 févr. 46     | 15.40...17.50 | Couvert; puis pluie. Vent modéré du sud-ouest   | 6,6                           | 729                              | 1,005                         | 5,4               | 75       |                                                                                                  |
| 5           | 22 févr. 46     | 09.55...12.00 | Couvert. Vent d'ouest modéré                    | 0...1,2                       | 727,5                            | 1,028...1,023                 | 4,2...4,4         | 85...95  |                                                                                                  |
| 6           | 28 févr. 46     | 14.30...17.20 | Nuageux. Faible fœhn                            | 12,3                          | 734                              | 0,995                         | 5,9               | 55       |                                                                                                  |
| 7           | 21 mai 46       | 11.00...14.30 | Pluie; puis couvert. Faible vent d'est          | 14,1...17,5                   | 727                              | 0,977...0,967                 | 10,6...9,9        | 85...65  |                                                                                                  |
| 8           | 24 mai 46       | 13.50...16.20 | Couvert. Faible vent du sud-ouest. Orage        | 19,2 ...19,7                  | 722...720                        | 0,953...0,950                 | 10...10,8         | 60...65  |                                                                                                  |
| 9           | 28 mai 46       | 17.20...19.30 | Nuageux. Faible vent du sud-ouest               | 24,4...20                     | 724...723                        | 0,940...0,953                 | 7...9,5           | 32...55  | Première valeur:<br>au début des essais<br>en plein air                                          |
| 10          | 28 juin 46      | 17.20...19.15 | Beau. Faible vent du sud-ouest                  | 26,8...24                     | 730                              | 0,942...0,950                 | 12,2...11,8       | 47...55  |                                                                                                  |
| 11          | 10 juillet 46   | 16.30...18.40 | Très beau. Bise modérée                         | 26,8...24,6                   | 733                              | 0,945...0,953                 | 10...11           | 39...47  |                                                                                                  |
| 12          | 25 juillet 46   | 10.40...12.20 | Couvert. Vent modéré du sud-ouest               | 26...25                       | 731                              | 0,945                         | 13,6...15,9       | 55...70  | Seconde valeur:<br>à la fin des essais<br>en plein air                                           |
| 13          | 31 juillet 46   | 15.20...17.15 | Nuageux. Vent modéré du sud-ouest               | 26,4...26                     | 730                              | 0,945                         | 12,5...12,7       | 50...52  |                                                                                                  |
| 14          | 22 août 46      | 15.25...17.50 | Beau. Faible bise                               | 15,5...15,7                   | 732                              | 0,975                         | 7,9...7,6         | 60...56  |                                                                                                  |
| 15          | 5 sept. 46      | 15.50...18.00 | Couvert. Faible vent du sud-ouest               | 17,8...16,2                   | 725                              | 0,963...0,968                 | 13...12,9         | 85...90  |                                                                                                  |
| 16          | 14 sept. 46     | 11.20...15.00 | Beau. Faible bise                               | 17,5...23,8                   | 729...727                        | 0,970...0,945                 | 10,1...11,9       | 68...55  |                                                                                                  |
| 17          | 15 sept. 46     | 10.15...12.30 | Couvert. Fort vent du sud-ouest                 | 14,5...16,2                   | 729...730                        | 0,980...0,975                 | 9,6...8,9         | 75...65  |                                                                                                  |
| 18          | 20 sept. 46     | 15.10...17.35 | Très beau. Vent modéré du sud-ouest             | 23...21                       | 723...722                        | 0,943...0,948                 | 12...13,3         | 57...72  |                                                                                                  |
| 19          | 5 oct. 46       | 10.00...12.05 | Couvert. Fort vent du sud-ouest                 | 12,3...14                     | 728                              | 0,985...0,980                 | 8,9...9,4         | 82...78  |                                                                                                  |
| 20          | 18 oct. 46      | 10.25...12.20 | Brouillard. Faible bise                         | 7,4...8,4                     | 730                              | 1,005...1,0                   | 7,2               | 93...87  |                                                                                                  |
| 21          | 5 nov. 46       | 15.00...16.30 | Nuageux. Forte bise                             | 7,5...6,9                     | 736                              | 1,012...1,015                 | 4,9...5           | 62...66  |                                                                                                  |
| 22          | 25 nov. 46      | 15.10...16.35 | Couvert. Brumeux. Faible vent du sud-est        | 8,8...6,1                     | 725                              | 1,0...1,003                   | 5,9...5,7         | 77...80  |                                                                                                  |
| 23          | 4 déc. 46       | 15.35...18.40 | Brouillard. Très faible vent d'est              | 3,0                           | 717,5                            | 1,0                           | 4,8...4,7         | 88...89  |                                                                                                  |
| 24          | 11 déc. 46      | 15.35...17.05 | Léger brouillard. Faible vent du sud-ouest      | 3,8...3,2                     | 725                              | 1,010                         | 5,3...5,0         | 88...90  |                                                                                                  |
| 25          | 31 janv. 47     | 15.35...17.00 | Beau. Brumeux. Faible bise                      | 0,6...1,0                     | 722                              | 1,020                         | 2,3...2,2         | 48...51  |                                                                                                  |
| 26          | 10 févr. 47     | 16.25...17.40 | Nuageux. Faible vent du sud-ouest               | 5,9...4,2                     | 717...718                        | 0,993...1,0                   | 4,8...5,0         | 69...82  |                                                                                                  |
| 27          | 13 févr. 47     | 16.00...17.15 | Brouillard élevé. Faible vent d'est             | 0                             | 721                              | 1,020                         | 3,9...4,0         | 85...87  |                                                                                                  |
| 28          | 20 févr. 47     | 15.50...17.05 | Nuageux. Brumeux. Faible vent d'ouest           | —0,3...0                      | 719                              | 1,018                         | 3                 | 65       |                                                                                                  |
| 29          | 26 févr. 47     | 15.40...17.00 | Très beau. Forte bise. Dégel                    | 1,0...0,2                     | 723                              | 1,020                         | 2,9               | 60...63  |                                                                                                  |
| 30          | 17 juin 47      | 16.05...17.30 | Très beau. Bise modérée                         | 24,6...23                     | 729                              | 0,947...0,950                 | 5,6...5,3         | 25       |                                                                                                  |
| 31          | 1er juillet 47  | 10.10...11.40 | Couvert; puis pluie. Vent d'ouest modéré        | 19,5                          | 730                              | 0,964                         | 11,1...13,6       | 65...80  |                                                                                                  |
| 32          | 11 juillet 47   | 16.15...18.00 | Averse. Fort vent du sud                        | 17,5                          | 726                              | 0,965                         | 12,6...11,5       | 84...77  |                                                                                                  |
| 33          | 28 août 47      | 15.50...18.05 | Nuageux. Bise modérée                           | 25,8...24,6                   | 729                              | 0,943...0,948                 | 7...7,6           | 29...34  |                                                                                                  |
| 34          | 10 sept. 47     | 15.15...17.30 | Beau. Vent modéré du sud-ouest                  | 28,5...26,2                   | 731,5                            | 0,936...0,945                 | 9,4...10,2        | 35...41  |                                                                                                  |
| 35          | 15 sept. 47     | 15.10...17.20 | Très beau. Bise modérée                         | 31,1...29,7                   | 730,5...729,5                    | 0,927...0,932                 | 8,7...9,0         | 27...30  |                                                                                                  |
| 36          | 6 oct. 47       | 15.50...18.10 | Très beau. Faible bise                          | 22,3...15                     | 730                              | 0,955...0,980                 | 8,5...10,8        | 45...82  |                                                                                                  |
| 37          | 17 oct. 47      | 11.00...15.15 | Nuageux; puis couvert. Faible vent du sud-ouest | 16,4...15,7                   | 733...732                        | 0,978                         | 7,7...7,8         | 55...57  |                                                                                                  |
| 38          | 21 nov. 47      | 11.30...15.50 | Couvert; puis beau. Faible vent d'ouest         | 9,8...11,1                    | 738                              | 1,008...1,0                   | 8,2               | 89...82  |                                                                                                  |
| 39          | 23 déc. 47      | 11.20...15.30 | Couvert. Vent modéré du sud-ouest               | 4,2...5,1                     | 733                              | 1,020...1,018                 | 5,5...5,1         | 90...77  |                                                                                                  |
| 40          | 10 févr. 48     | 15.15...17.10 | Couvert. Faible vent du sud-ouest               | 10,4...9                      | 730...729                        | 0,995...1,0                   | 4,7...5,3         | 45...60  |                                                                                                  |

Conditions météorologiques durant les essais. Pression et humidité de l'air. (Valables pour les matériels disposés dans le garage.)

Tableau II

| Série<br>N° | Date des essais            | Heures        | Conditions météorologiques durant les essais    | Température<br>de l'air<br>°C | Hauteur<br>barométrique<br>mm Hg | Facteur de<br>correction<br>k | Humidité de l'air |         | Remarques                                                                                   |
|-------------|----------------------------|---------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |                            |               |                                                 |                               |                                  |                               | g/m³              | %       |                                                                                             |
| 1           | 19 déc. 45                 | 18.00...18.45 | Brouillard. Faible vent d'ouest                 | 4,7                           | 712                              | 1,0                           | 5,8               | 90      | Valables pour:<br>éclateurs à sphères de 250<br>et 125 mm de diamètre;<br>traversée d'essai |
| 2           | 14 janv. 46                | 10.30...14.00 | Couvert. Faible bise                            | 0,5...1,0                     | 737                              | 1,04                          | 2,3               | 50      |                                                                                             |
| 3           | 6 févr. 46                 | 17.25...18.10 | Faible pluie. Vent modéré du sud-ouest          | 7,2...7,3                     | 729                              | 1,005                         | 6,5               | 85      |                                                                                             |
| 4           | 19 févr. 46                | 14.10...15.00 | Couvert. Faible vent du sud-ouest               | 7,2                           | 729                              | 1,005                         | 5,8               | 75      |                                                                                             |
| 5           | 22 févr. 46                | 15.10...14.20 | Couvert. Vent d'ouest modéré                    | 6                             | 728                              | 1,008                         | 2,8               | 40      |                                                                                             |
| 6           | 28 févr. 46                | 11.25...12.10 | Nuageux. Brouillard. Faible fœhn                | 8,4                           | 736                              | 1,010                         | 6,1               | 75      |                                                                                             |
| 7           | 21 mai 46                  | 09.00...09.50 | Légère pluie. Faible vent d'est                 | 15,8...16,8                   | 727                              | 0,973...0,970                 | 10,1              | 75...70 | Première valeur:<br>au début des essais<br>dans le garage                                   |
| 8           | 24 mai 46                  | 11.25...12.10 | Nuageux. Faible vent du sud-ouest               | 17,8...19,7                   | 722                              | 0,958...0,953                 | 10                | 60...65 |                                                                                             |
| 9           | 28 mai 46                  | 16.10...16.50 | Nuageux. Faible vent du sud-ouest               | 22,8...24,1                   | 724                              | 0,945...0,940                 | 7,3...6,6         | 35...30 |                                                                                             |
| 10          | 28 juin 46                 | 16.15...16.55 | Nuageux. Chaud. Faible vent du sud-ouest        | 25...25,5                     | 730                              | 0,945                         | 13...11,5         | 55...50 |                                                                                             |
| 11          | 10 juillet 46              | 15.30...16.10 | Très beau. Bise modérée                         | 24,5                          | 733                              | 0,950                         | 10                | 45      | Seconde valeur:<br>à la fin des essais<br>dans le garage                                    |
| 12          | 25 juillet 46              | 09.30...10.15 | Nuageux. Faible vent du sud-ouest               | 26...27,2                     | 730                              | 0,945...0,940                 | 13,6              | 55      |                                                                                             |
| 13          | 31 juillet 46              | 14.15...14.55 | Nuageux. Vent modéré du sud-ouest               | 26...26,2                     | 730                              | 0,945                         | 13...12,5         | 53...50 |                                                                                             |
| 14          | 22 août 46                 | 14.10...15.10 | Couvert. Faible bise                            | 18                            | 732                              | 0,970                         | 8,1               | 53      |                                                                                             |
| 15          | 5 sept. 46                 | 14.45...15.40 | Averse. Faible vent du sud-ouest                | 18,8...19,8                   | 724...725                        | 0,960...0,957                 | 13,2...13         | 80...75 |                                                                                             |
| 16          | 14 sept. 46                | 10.10...11.05 | Brouillard; puis très beau. Faible vent d'ouest | 16,8...19                     | 729                              | 0,972...0,965                 | 9,9...11,2        | 72...68 |                                                                                             |
| 17          | 15 sept. 46                | 08.55...09.50 | Couvert. Vent modéré du sud-ouest               | 18...18,2                     | 728                              | 0,965                         | 10,2...9,6        | 65...60 |                                                                                             |
| 18          | 20 sept. 46                | 13.55...14.50 | Très beau. Vent modéré du sud-ouest             | 22,4...24,5                   | 724                              | 0,947...0,940                 | 12,4...12,1       | 62...55 |                                                                                             |
| 19          | 5 oct. 46                  | 08.50...09.40 | Couvert. Faible vent du sud-ouest               | 16,2                          | 728                              | 0,972                         | 8,9               | 63      |                                                                                             |
| 20          | 18 oct. 46                 | 09.25...10.05 | Epais brouillard. Très faible bise              | 10,2                          | 730                              | 0,995                         | 7,1               | 75      |                                                                                             |
| 21          | 5 nov. 46                  | 14.00...14.50 | Nuageux. Bise modérée                           | 10                            | 736                              | 1,005                         | 5,4               | 58      |                                                                                             |
| 22          | 25 nov. 46                 | 14.05...15.00 | Couvert. Faible vent du sud-ouest               | 8,5                           | 725                              | 0,995                         | 5,6               | 67      |                                                                                             |
| 23          | 4 déc. 46                  | 14.20...15.15 | Brouillard. Très faible vent d'est              | 5,9...5,2                     | 716                              | 0,990...0,995                 | 5,1...4,9         | 73...74 |                                                                                             |
| 24          | 11 déc. 46                 | 14.20...15.10 | Léger brouillard. Faible vent du sud-ouest      | 6,6...6,5                     | 725                              | 10                            | 5,5...5,3         | 77...75 |                                                                                             |
| 25          | 31 janv. 47                | 14.15...15.05 | Beau. Brumeux. Faible bise                      | 0,4...1,0                     | 722                              | 1,02...1,015                  | 2,2...2,1         | 47...43 |                                                                                             |
| 26          | 10 févr. 47                | 15.20...16.10 | Nuageux. Très faible vent du sud-ouest          | 6,8                           | 717                              | 0,990                         | 4,7...4,8         | 62...64 |                                                                                             |
| 27          | 13 févr. 47                | 14.35...15.35 | Brouillard et gelée blanche                     | 2,6...3                       | 721                              | 1,010                         | 4,1...4           | 78...72 |                                                                                             |
| 28          | 20 févr. 47                | 14.45...15.35 | Couvert. Brumeux. Faible bise                   | 1,5...2,4                     | 719                              | 1,010                         | 3...2,9           | 60...55 |                                                                                             |
| 29          | 26 févr. 47                | 14.30...15.20 | Très beau. Léger dégel. Faible bise             | 1,8...2,8                     | 723                              | 1,015...1,010                 | 2,9...2,7         | 57...50 |                                                                                             |
| 30          | 17 juin 47                 | 15.00...15.50 | Très beau. Bise modérée                         | 23,1...23,8                   | 729                              | 0,950...0,947                 | 7,1...6,6         | 34...30 |                                                                                             |
| 31          | 1 <sup>er</sup> juillet 47 | 09.00...09.55 | Couvert. Vent d'ouest modéré                    | 24                            | 730                              | 0,950                         | 11,2              | 51      |                                                                                             |
| 32          | 11 juillet 47              | 15.05...15.55 | Couvert. Quelques averses. Fort vent du sud     | 19...20,5                     | 725                              | 0,960...0,955                 | 11,1...10,5       | 67...58 |                                                                                             |
| 33          | 28 août 47                 | 14.45...15.35 | Nuageux. Bise modérée                           | 23,8...25,4                   | 729                              | 0,948...0,943                 | 7,2...6,9         | 34...30 |                                                                                             |
| 34          | 10 sept. 47                | 14.10...15.00 | Beau. Vent du sud-ouest modéré                  | 23,8...27                     | 731,5                            | 0,950...0,940                 | 10,1...9,1        | 46...35 |                                                                                             |
| 35          | 15 sept. 47                | 14.05...14.55 | Très beau. Faible bise                          | 26,2...28,8                   | 731                              | 0,943...0,935                 | 10...9            | 40...32 |                                                                                             |
| 36          | 6 oct. 47                  | 14.20...15.10 | Très beau. Faible bise                          | 19,6...21                     | 730                              | 0,965...0,960                 | 9...8,5           | 52...45 |                                                                                             |
| 37          | 17 oct. 47                 | 10.45...11.35 | Nuageux. Très faible vent d'ouest               | 14,2...15,5                   | 733,5                            | 0,985...0,983                 | 8,3...8,1         | 67...60 |                                                                                             |
| 38          | 21 nov. 47                 | 10.15...11.05 | Couvert. Faible brouillard. Faible vent d'ouest | 10,9...12,1                   | 738                              | 1,003...1,0                   | 8,1               | 82...76 |                                                                                             |
| 39          | 23 déc. 47                 | 10.10...11.00 | Faible pluie. Très fort vent du sud-ouest       | 5,6...6,5                     | 733,5                            | 1,017...1,012                 | 5,7...5,5         | 83...75 |                                                                                             |
| 40          | 10 févr. 48                | 14.10...15.00 | Couvert. Très faible vent du sud-ouest          | 11...12,3                     | 730                              | 0,995...0,990                 | 5                 | 50...46 |                                                                                             |

Conditions météorologiques avant le début des séries de mesures  
Tableau III

| Série<br>N° | Conditions météorologiques avant les essais                                                                                              |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1, 2        | (pas noté)                                                                                                                               |
| 3           | Fort vent du sud-ouest, accompagné de pluie                                                                                              |
| 4           | Couvert, très faible vent du sud-ouest                                                                                                   |
| 5           | A 21 <sup>h</sup> 00 chute de neige, mêlée à de la pluie.<br>De 21 <sup>h</sup> 00 à 22 <sup>h</sup> 00, baisse de la température et gel |
| 6           | Le matin, nuageux et brumeux. Föhn                                                                                                       |
| 7           | Pluie durant la nuit et faible vent d'est le matin                                                                                       |
| 8           | (pas noté)                                                                                                                               |
| 9           | Le matin, brouillard jusque vers 08 <sup>h</sup> 00, puis nuageux. Faible vent du sud-ouest                                              |
| 10          | Le matin, très beau. L'après-midi, nuageux. Faible vent du sud-ouest                                                                     |
| 11          | Dégel durant la nuit. Le matin, très beau. Bise modérée                                                                                  |
| 12          | Très beau la veille et durant la nuit. Le matin, nuageux. Très faible vent du sud-ouest                                                  |
| 13          | Beau la veille et durant la journée. Vent modéré du sud-ouest                                                                            |
| 14          | Pluie la veille au soir et durant la nuit. Le matin, couvert. Faible vent d'ouest                                                        |
| 15          | La veille et durant la nuit, pluie diminuant. Le matin, couvert. Vent modéré du sud-ouest                                                |
| 16          | Beau la veille. Très fort brouillard durant la nuit et le matin, mais se dissipant peu avant le début des essais                         |
| 17          | Beau la veille. Couvert durant la nuit et le matin. Vent modéré du sud-ouest                                                             |
| 18          | La veille, très fort vent, accompagné de pluie. Le matin, beau. Vent modéré du sud-ouest                                                 |
| 19          | Couvert la veille et durant la nuit. Faible vent d'ouest                                                                                 |
| 20          | La veille, beau et faible vent. Le matin, brouillard très dense                                                                          |
| 21          | Brouillard la veille et durant la nuit. Le matin couvert et faible bise                                                                  |
| 22          | Couvert la veille, durant la nuit et le matin. Faible vent du sud-ouest                                                                  |
| 23          | La veille, fort vent du sud-ouest, accompagné de pluie. Durant la nuit et le matin, assez fort brouillard et très faible vent            |
| 24          | Couvert durant la nuit. Le matin, brouillard et très faible vent du sud-ouest                                                            |
| 25          | La veille et le matin, brouillard et faible bise                                                                                         |
| 26          | La veille, nuageux et dégel. Gel durant la nuit. Le matin, assez beau et très faible vent du sud                                         |
| 27          | La veille, très beau et très léger brouillard, temps calme. Le matin, brouillard très dense et givre                                     |
| 28          | Couvert et brumeux, faible bise                                                                                                          |
| 29          | La veille, forte chute de neige et forte bise. Gel durant la nuit. Le matin, nuageux, puis très beau, dégel                              |
| 30          | La veille, beau. Assez froid durant la nuit. Le matin, beau et chaud, bise modérée                                                       |
| 31          | La veille, nuageux et vent d'ouest modéré                                                                                                |
| 32          | La veille, durant la nuit et le matin, couvert avec quelques averses et fort vent du sud                                                 |
| 33          | La veille, durant la nuit et le matin, nuageux et bise modérée                                                                           |
| 34          | La veille, nuageux et vent du sud. Le matin, beau et bise modérée                                                                        |
| 35          | La veille et durant la journée, très beau et bise modérée                                                                                |
| 36          | La veille, très beau. Le matin, brouillard, puis très beau, faible bise                                                                  |
| 37          | La veille, nuageux. Très épais brouillard durant la nuit et le matin, jusqu'au début des essais                                          |
| 38          | Couvert par brouillard élevé, très faible vent d'ouest                                                                                   |
| 39          | Couvert et diminution de la pluie, fort vent du sud-ouest                                                                                |
| 40          | Le matin, beau, très faible vent du sud-ouest                                                                                            |

peu d'influence sur la tension d'amorçage et que les valeurs individuelles n'offrent qu'une faible bande de dispersion. Pratiquement, toutes les valeurs d'amorçage sont comprises entre  $\pm 10\%$  de la moyenne de la même polarité, voire même, pour l'une des fabrications, entre  $\pm 7\%$  de la moyenne seulement.

Pour mieux se rendre compte de ce comportement et de la présence éventuelle d'influences extérieures, les résultats de ces mesures de parafoudres ont été interprétés plus en détail, en calculant non plus la fréquence  $p$  des valeurs d'amorçage dans un intervalle de tension limité, mais bien la fréquence de toutes les tensions d'amorçage ou de contournement jusqu'à une certaine valeur de tension, c'est-à-dire en considérant la *fréquence cumulée*  $\Sigma$ , qui a été reportée sur un papier à coordonnées spéciales, choisies de telle sorte que la fréquence cumulée d'une distribution de Gauss soit représentée sous forme d'une droite. Dans ce but, l'échelle des abscisses (fréquence cumulée) n'est pas linéaire, tandis que l'échelle des tensions le demeure.

Les fig. 37 à 42 indiquent la fréquence cumulée des tensions d'amorçage de deux parafoudres de chacune des fabrications, reportée sur ce réseau de probabilité, tandis que les fig. 43 à 48 représentent les fréquences cumulées avec une échelle linéaire ordinaire pour la tension et la fréquence cumulée, celle-ci étant reportée en ordonnée.

Le point  $P$  ( $\Sigma = 50\%$ ) de la fig. 41 signifie, par exemple, que le 50 % de toutes les tensions d'amorçage négatives mesurées sont inférieures à 170 kV. Le point  $Q$  (160 kV), qui donne une abscisse  $\Sigma = 5\%$  pour tension positive, signifie que des amorçages ont encore lieu à cette tension pour le 5 % de tous les chocs appliqués (« tension 5 % d'amorçage »). En somme, ces courbes se rapprochent beaucoup de la distribution de Gauss, de sorte que de nettes influences inconnues ne s'exercent manifestement plus sur ces parafoudres.

A la suite des observations faites durant deux ans, on peut dire qu'actuellement, parmi les matériels essayés, ce sont les parafoudres à éclateur, surtout certains d'entre eux, qui présentent la relation relativement la mieux définie entre la tension d'amorçage et la distance disruptive (ou la construction). En conséquence, pour la mesure de surtensions de brève durée, ces parafoudres sont nettement supérieurs aux éclateurs à tiges et bien meilleurs que les éclateurs à sphères.

Toutefois, la moindre trace d'humidité dans ces parafoudres à éclateur provoque un accroissement excessif de la dispersion en service continu.

Le tableau IV indique les *tensions* qui se rapportent à une certaine fréquence d'amorçage ou de contournements et le tableau V leur *écart en pour cent* de la moyenne de toutes les tensions des divers matériels. Les unités figurant dans ces tableaux sont celles qui sont actuellement utilisées pour la technique de la haute tension et la théorie des probabilités:

a) Tensions 95 % et 5 % de contournement ou d'amorçage  $u$ , respectivement leur écart en pour

*Fréquence cumulée ( $\Sigma\%$ ) des tensions de contournement ou d'amorçage ( $U$ ) en kV (valeur de crête) Tableau IV*

| Matériel                                          | Polarité | Moyenne | Plus petite valeur mesurée | $\Sigma\%$ = Pourcentage des contournements ou amorçages ayant eu lieu à des tensions plus faibles ou égales à la valeur indiquée dans ce tableau, exprimé en % de toutes les sollicitations |       |       |       |       |       |       |       |     | Plus grande valeur mesurée |
|---------------------------------------------------|----------|---------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|----------------------------|
|                                                   |          |         |                            | 1%                                                                                                                                                                                           | 5%    | 10%   | 16%   | 50%   | 84%   | 90%   | 95%   | 99% |                            |
| Tension de contournement ou d'amorçage            |          | kV      | kV                         | kV                                                                                                                                                                                           | kV    | kV    | kV    | kV    | kV    | kV    | kV    | kV  | kV                         |
| Isolateur-support                                 | +        | 280,0   | 238                        | 238                                                                                                                                                                                          | 258   | 263   | 268   | 283   | 288   | 293   | 303   | 308 | 313                        |
|                                                   | —        | 283,0   | 238                        | 248                                                                                                                                                                                          | 263   | 268   | 268   | 283   | 293   | 303   | 303   | 313 | 318                        |
| Isolateur de suspension à deux éléments           | +        | 260,0   | 223                        | 228                                                                                                                                                                                          | 248   | 253   | 253   | 263   | 278   | 288   | 288   | 293 | 293                        |
|                                                   | —        | 272,0   | 238                        | 243                                                                                                                                                                                          | 253   | 258   | 263   | 273   | 283   | 283   | 288   | 288 | 298                        |
| Isolateur de traversée                            | +        | 257,5   | 223                        | 233                                                                                                                                                                                          | 238   | 243   | 248   | 258   | 268   | 273   | 278   | 288 | 293                        |
|                                                   | —        | 296,0   | 248                        | 258                                                                                                                                                                                          | 268   | 283   | 283   | 293   | 308   | 308   | 313   | 318 | 318                        |
| Eclateur à tiges 260 mm                           | +        | 247,5   | 203                        | 213                                                                                                                                                                                          | 223   | 228   | 238   | 248   | 258   | 263   | 268   | 268 | 273                        |
|                                                   | —        | 290,0   | 258                        | 263                                                                                                                                                                                          | 268   | 273   | 273   | 288   | 303   | 308   | 318   | 328 | 333                        |
| Eclateur à sphères 250 mm $\varnothing$ propre    | +        | 182,0   | 153                        | 158                                                                                                                                                                                          | 168   | 168   | 173   | 178   | 193   | 198   | 203   | 223 | 238                        |
|                                                   | —        | 210,3   | 158                        | 163                                                                                                                                                                                          | 173   | 173   | 178   | 203   | 238   | 258   | 268   | 313 | 338                        |
| Eclateur à sphères 125 mm $\varnothing$ propre    | +        | 162,0   | 133                        | 138                                                                                                                                                                                          | 143   | 148   | 148   | 163   | 173   | 173   | 183   | 198 | 203                        |
|                                                   | —        | 163,3   | 123                        | 133                                                                                                                                                                                          | 138   | 143   | 148   | 168   | 168   | 173   | 173   | 198 | 203                        |
| Eclateur à sphères 125 mm $\varnothing$ poussier. | +        | 172,5   | 133                        | 143                                                                                                                                                                                          | 158   | 163   | 163   | 173   | 183   | 183   | 188   | 193 | 198                        |
|                                                   | —        | 176,4   | 143                        | 148                                                                                                                                                                                          | 148   | 158   | 158   | 173   | 193   | 193   | 203   | 218 | 223                        |
| Parafoudre FKH n° 1 Fabrication A n° 1            | +        | 153,7   | 145                        | —                                                                                                                                                                                            | 146,5 | 147,0 | 148,0 | 152,5 | 157,5 | 159,5 | 160,0 | —   | 168                        |
|                                                   | —        | 157,4   | 141                        | —                                                                                                                                                                                            | 147,5 | 149,3 | 150,6 | 157,0 | 160,0 | 161,5 | 164,5 | —   | 171                        |
| Parafoudre FKH n° 2 Fabrication A n° 2            | +        | 163,5   | 152                        | —                                                                                                                                                                                            | 157,0 | 157,5 | 158,6 | 162,0 | 166,5 | 167,7 | 169,5 | —   | 183                        |
|                                                   | —        | 165,6   | 149                        | —                                                                                                                                                                                            | 155,5 | 157,5 | 160,0 | 165,0 | 170,0 | 171,0 | 172,5 | —   | 177                        |
| Parafoudre FKH n° 6 Fabrication B n° 1            | +        | 162,5   | 120                        | —                                                                                                                                                                                            | 149,0 | 152,5 | 154,5 | 162,5 | 168,3 | 170,3 | 172,3 | —   | 179                        |
|                                                   | —        | 164,0   | 112                        | —                                                                                                                                                                                            | 141,0 | 149,0 | 155,5 | 165,5 | 172,0 | 175,7 | 177,7 | —   | 187                        |
| Parafoudre FKH n° 7 Fabrication B n° 2            | +        | 165,2   | 129                        | —                                                                                                                                                                                            | 152,5 | 157,5 | 159,0 | 165,0 | 170,0 | 171,5 | 174,0 | —   | 179                        |
|                                                   | —        | 166,8   | 119                        | —                                                                                                                                                                                            | 147,0 | 151,5 | 156,5 | 167,5 | 175,0 | 177,0 | 180,5 | —   | 186                        |
| Parafoudre FKH n° 11 Fabrication C n° 1           | +        | 173,8   | 148                        | —                                                                                                                                                                                            | 160,5 | 163,3 | 166,5 | 173,0 | 180,0 | 182,0 | 184,0 | —   | 194                        |
|                                                   | —        | 170,0   | 146                        | —                                                                                                                                                                                            | 155,5 | 158,4 | 162,0 | 170,0 | 176,0 | 177,5 | 180,3 | —   | 190                        |
| Parafoudre FKH n° 12 Fabrication C n° 2           | +        | 186,4   | 158                        | —                                                                                                                                                                                            | 167,0 | 170,0 | 173,0 | 186,5 | 196,5 | 199,5 | 203,0 | —   | 214                        |
|                                                   | —        | 184,2   | 164                        | —                                                                                                                                                                                            | 170,0 | 173,0 | 175,0 | 183,0 | 191,0 | 194,0 | 197,5 | —   | 206                        |

*Écart en pour cent ( $\Delta\%$ ) des tensions de contournement ou d'amorçage ( $U$ ) par rapport à la moyenne  $U_{med}$  de toutes les mesures durant 2 ans*

$$\Delta\% = \frac{U - U_{med}}{U_{med}} 100\%$$

Tableau V

| Matériel                                          | Polarité | Moyenne $U_{med}$<br>kV | Plus petite valeur mesurée | $\Sigma\%$ = Pourcentage des contournements ou amorçages ayant eu lieu à des tensions plus faibles ou égales à la valeur indiquée dans ce tableau, exprimé en % de toutes les sollicitations |       |       |       |       |       |       |       |      | Plus petite valeur mesurée |
|---------------------------------------------------|----------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----------------------------|
|                                                   |          |                         |                            | 1%                                                                                                                                                                                           | 5%    | 10%   | 16%   | 50%   | 84%   | 90%   | 95%   | 99%  |                            |
| Écart en pour cent                                |          |                         | —%                         | —%                                                                                                                                                                                           | —%    | —%    | —%    | %     | +%    | +%    | +%    | +%   | +%                         |
| Isolateur-support                                 | +        | 280,0                   | 15,0                       | 15,0                                                                                                                                                                                         | 7,85  | 6,1   | 4,65  | +1,07 | 2,85  | 4,65  | 8,25  | 10,0 | 11,8                       |
|                                                   | —        | 283,0                   | 16,0                       | 12,3                                                                                                                                                                                         | 7,07  | 5,3   | 5,30  | 0     | 3,53  | 7,06  | 7,06  | 10,6 | 12,4                       |
| Isolateur de suspension à deux éléments           | +        | 260,0                   | 14,2                       | 12,3                                                                                                                                                                                         | 4,61  | 2,69  | 2,69  | +1,15 | 6,82  | 10,76 | 10,76 | 12,7 | 12,7                       |
|                                                   | —        | 272,0                   | 12,5                       | 11,65                                                                                                                                                                                        | 7,0   | 5,14  | 3,31  | +0,37 | 4,04  | 4,04  | 5,51  | 5,51 | 9,55                       |
| Isolateur de traversée                            | +        | 257,5                   | 13,4                       | 9,55                                                                                                                                                                                         | 7,56  | 5,62  | 3,69  | +0,2  | 3,69  | 6,0   | 7,95  | 11,5 | 13,8                       |
|                                                   | —        | 296,0                   | 16,2                       | 12,83                                                                                                                                                                                        | 9,45  | 4,4   | 4,4   | —1,01 | 4,05  | 4,05  | 5,75  | 7,4  | 7,4                        |
| Eclateur à tiges 260 mm                           | +        | 247,5                   | 18,0                       | 13,9                                                                                                                                                                                         | 9,9   | 7,87  | 3,84  | +0,22 | 4,24  | 6,25  | 8,3   | 8,3  | 10,3                       |
|                                                   | —        | 290,0                   | 11,0                       | 9,3                                                                                                                                                                                          | 7,42  | 5,87  | 5,87  | —0,69 | 4,48  | 6,21  | 9,65  | 13,1 | 15,2                       |
| Eclateur à sphères 250 mm $\varnothing$ propre    | +        | 182,0                   | 16,1                       | 13,2                                                                                                                                                                                         | 7,8   | 7,8   | 4,95  | —2,3  | 5,83  | 8,67  | 11,5  | 22,5 | 30,8                       |
|                                                   | —        | 210,3                   | 24,9                       | 22,5                                                                                                                                                                                         | 17,75 | 17,75 | 15,35 | —3,47 | 13,15 | 22,6  | 27,6  | 49,0 | 61,0                       |
| Eclateur à sphères 125 mm $\varnothing$ propre    | +        | 162,0                   | 17,9                       | 14,8                                                                                                                                                                                         | 11,7  | 9,26  | 9,26  | +0,62 | 6,80  | 6,80  | 13,0  | 22,2 | 25,3                       |
|                                                   | —        | 163,3                   | 24,7                       | 18,4                                                                                                                                                                                         | 15,5  | 12,42 | 9,37  | +2,88 | 2,88  | 5,95  | 5,95  | 21,3 | 24,3                       |
| Eclateur à sphères 125 mm $\varnothing$ poussier. | +        | 172,5                   | 22,9                       | 17,1                                                                                                                                                                                         | 8,4   | 5,5   | 5,5   | +0,29 | 6,08  | 6,08  | 9,0   | 11,8 | 14,8                       |
|                                                   | —        | 176,4                   | 18,9                       | 16,1                                                                                                                                                                                         | 16,1  | 10,44 | 10,44 | —1,93 | 9,42  | 9,42  | 15,1  | 23,6 | 26,4                       |
| Parafoudre FKH n° 1 Fabrication A n° 1            | +        | 153,7                   | 5,5                        | —                                                                                                                                                                                            | 4,7   | 4,4   | 3,7   | —0,78 | 2,5   | 3,8   | 4,1   | —    | 9,3                        |
|                                                   | —        | 157,4                   | 10,4                       | —                                                                                                                                                                                            | 6,3   | 5,1   | 4,3   | —0,25 | 1,65  | 2,6   | 4,5   | —    | 8,65                       |
| Parafoudre FKH n° 2 Fabrication A n° 2            | +        | 163,5                   | 7,04                       | —                                                                                                                                                                                            | 4,0   | 3,7   | 3,0   | —0,9  | 1,85  | 2,6   | 3,7   | —    | 11,9                       |
|                                                   | —        | 165,6                   | 9,96                       | —                                                                                                                                                                                            | 6,1   | 4,9   | 3,4   | —0,36 | 2,65  | 3,25  | 4,15  | —    | 6,85                       |
| Parafoudre FKH n° 6 Fabrication B n° 1            | +        | 162,5                   | 26,1                       | —                                                                                                                                                                                            | 8,3   | 6,1   | 4,9   | 0     | 3,5   | 4,8   | 6,0   | —    | 10,1                       |
|                                                   | —        | 164,0                   | 31,6                       | —                                                                                                                                                                                            | 14,0  | 9,15  | 5,2   | +0,92 | 4,9   | 7,15  | 8,35  | —    | 14,0                       |
| Parafoudre FKH n° 7 Fabrication B n° 2            | +        | 165,2                   | 21,9                       | —                                                                                                                                                                                            | 7,7   | 4,7   | 3,8   | —0,1  | 2,9   | 3,8   | 5,3   | —    | 8,35                       |
|                                                   | —        | 166,8                   | 28,7                       | —                                                                                                                                                                                            | 11,9  | 9,2   | 6,2   | +0,4  | 4,9   | 6,1   | 8,2   | —    | 11,5                       |
| Parafoudre FKH n° 11 Fabrication C n° 1           | +        | 173,8                   | 14,85                      | —                                                                                                                                                                                            | 7,65  | 6,05  | 4,2   | —0,46 | 3,5   | 4,7   | 5,9   | —    | 11,6                       |
|                                                   | —        | 170,0                   | 14,1                       | —                                                                                                                                                                                            | 8,5   | 6,8   | 4,7   | 0     | 3,5   | 4,4   | 6,06  | —    | 11,75                      |
| Parafoudre FKH n° 12 Fabrication C n° 2           | +        | 186,4                   | 15,2                       | —                                                                                                                                                                                            | 10,5  | 8,8   | 7,2   | +0,05 | 5,4   | 7,02  | 8,85  | —    | 14,8                       |
|                                                   | —        | 184,2                   | 10,85                      | —                                                                                                                                                                                            | 7,7   | 6,1   | 5,0   | —0,65 | 3,85  | 5,3   | 7,2   | —    | 11,85                      |

cent  $\Delta$  par rapport à la moyenne (valeur de 50 %, pour les courbes symétriques).

b) Tensions 90 % et 10 % de contournement ou d'amorçage  $u$ , respectivement leur écart en pour cent  $\Delta$  par rapport à la moyenne (valeur de 50 %, pour les courbes symétriques).

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \quad n \text{ nombre des valeurs mesurées (2)}$$

La valeur  $\sigma$  d'une distribution de Gauss dans un réseau de probabilité se détermine aisément par les

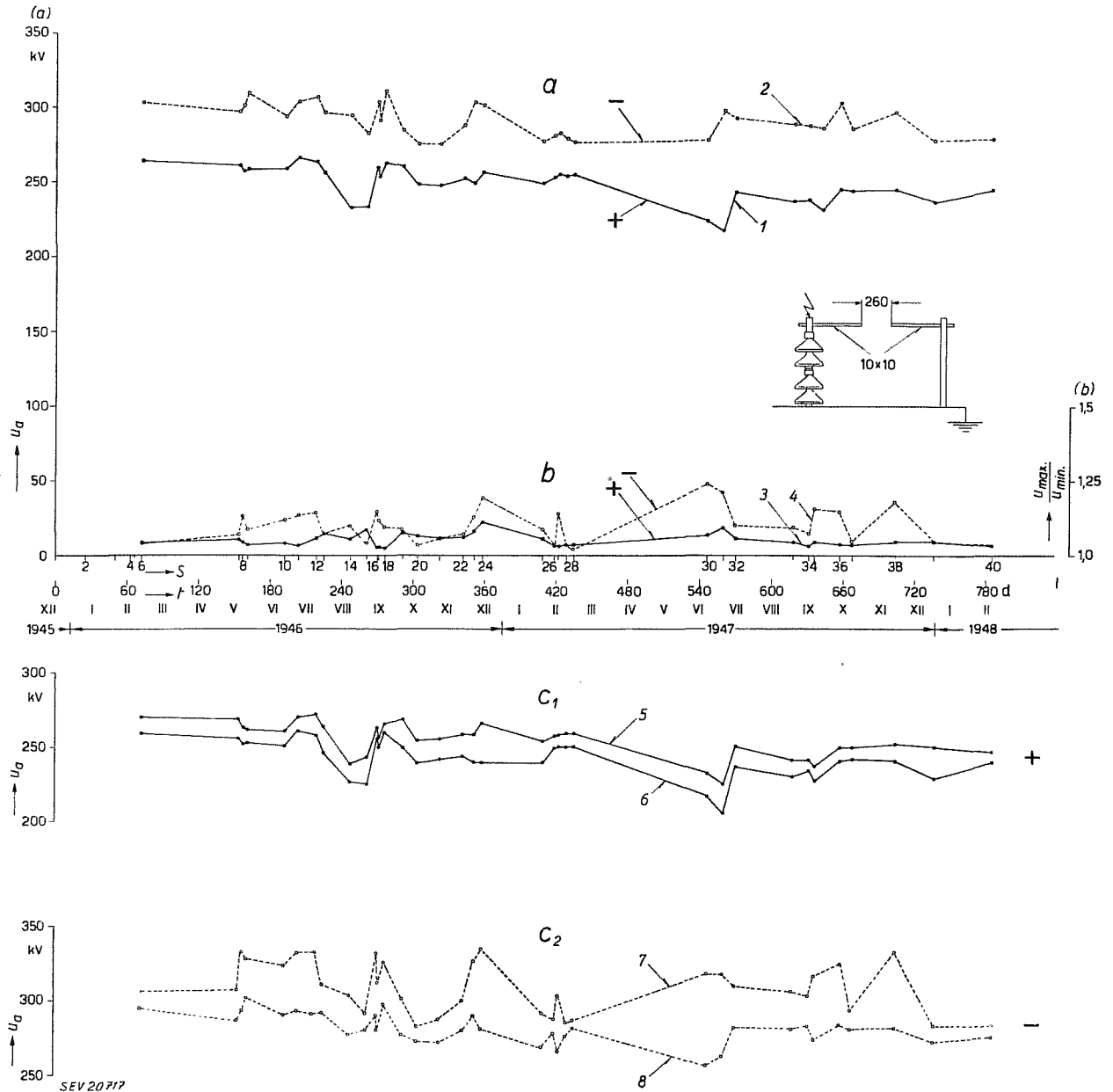


Fig. 17

Tension d'amorçage de l'éclateur à tiges représenté sur la fig. 6, ramenée à la densité normale de l'air (760 mm Hg, 20 °C) a, b et c, comme pour la fig. 11

c) Pour les parafoudres, tensions 84 % et 16 % d'amorçage et leurs écarts par rapport à la moyenne. Ces valeurs coïncident avec l'écart-type  $\sigma$  d'une distribution de Gauss (voir l'équation 1), lorsque la distribution dans le réseau de probabilité apparaît sous forme d'une droite rectiligne, c'est-à-dire lorsque la distribution mesurée correspond à une distribution de Gauss. L'écart quadratique moyen  $\sigma$  de la valeur de mesure  $x_i$  par rapport à la moyenne  $x_m$  est défini comme suit:

tensions qu'indique la ligne oblique pour les fréquences cumulées 16 % et 84 %.

Les tensions 95 %, 90 % et 84 % peuvent être considérées comme des valeurs approchées de la tension 100 % de contournement ou d'amorçage.

Les tensions 5 %, 10 % et 16 % se rapprochent de la « tension 0 % », c'est-à-dire de la tension à laquelle il ne peut plus du tout se produire de contournement, même pour un très grand nombre de chocs. Cette limite de la tension n'est théoriquement

définie que si le petit nombre de contournements résiduel, encore valable pour cette limite, est indiqué. Les valeurs des tensions 1 % et 1<sup>0</sup>/<sub>00</sub> sont en-

ments, par exemple la tension 1 %, ou 5 %, ou 10 %. Il serait d'ailleurs préférable d'indiquer le pourcentage.

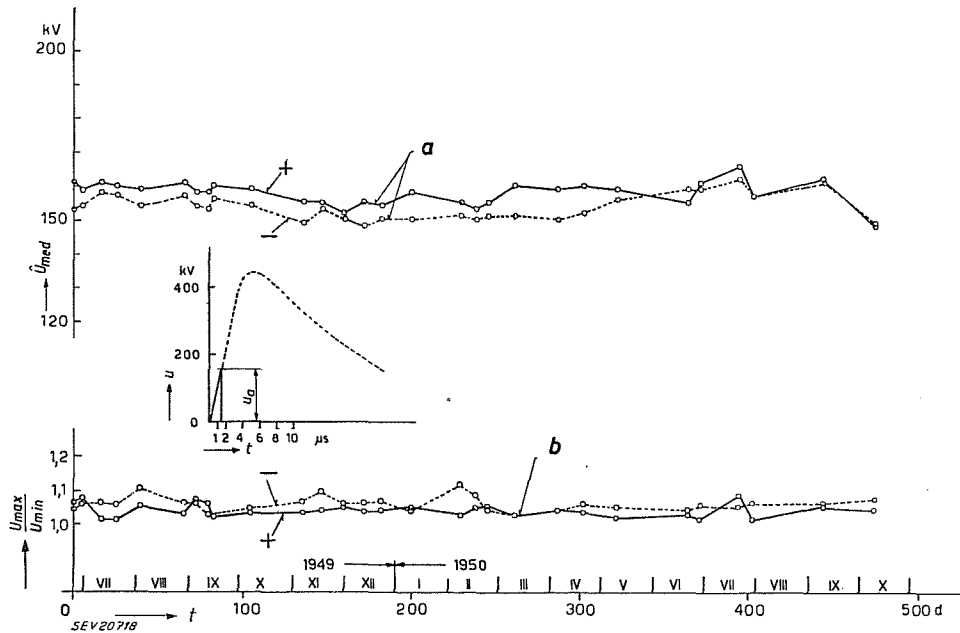


Fig. 18

Tension d'amorçage mesurée du parafoudre n° 1, fabrication A, non ramenée à la densité normale de l'air  
 a Moyennes positives et négatives de chaque série de mesures      b Rapport maximum/minimum de chaque série de mesures

$u$  Tension  
 $t$  Temps  
 $u_a$  Tension d'amorçage  
 $\frac{U_{max}}{U_{min}}$  Rapport maximum/minimum de chaque série de mesures  
 $\frac{U_{max}}{U_{med}}$  Moyenne de la tension d'amorçage, par série de mesures

core nettement différentes. Théoriquement, il est donc difficile de parler d'une «tension 0 %» à laquelle aucun contournement ne doit se produire, même pour un grand nombre quelconque de chocs, car il s'agit d'une valeur asymptotique de la tension,

Ces mêmes considérations concernent également la limite supérieure de la probabilité d'un amorçage ou d'un contournement, c'est-à-dire la «tension 100 %». En réalité, il s'agit d'une tension 90 %, ou 95 %, ou 99 %, qu'il serait préférable d'indiquer

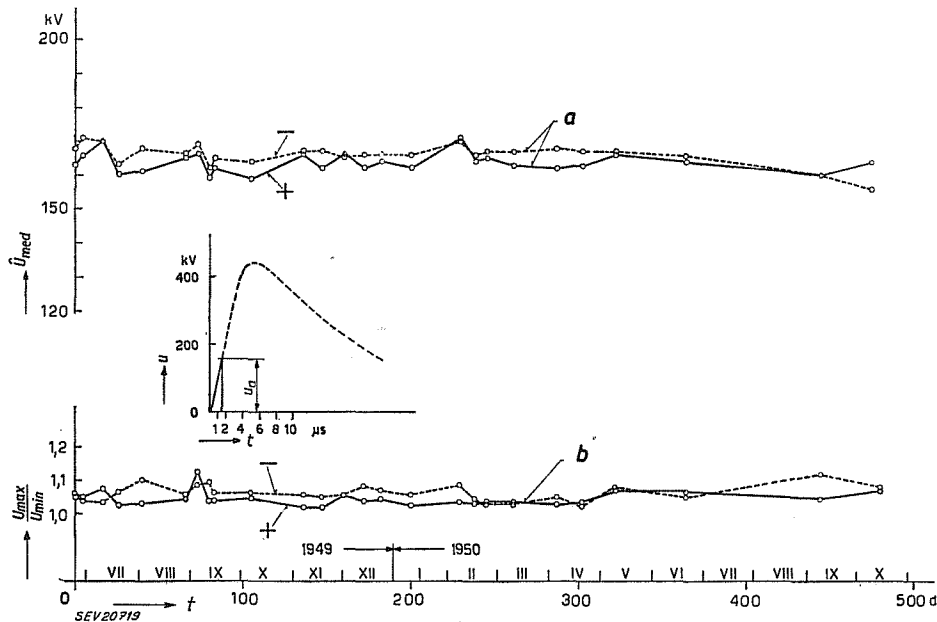


Fig. 19

Tension d'amorçage mesurée du parafoudre n° 2, fabrication A, non ramenée à la densité normale de l'air  
 Désignations, comme pour la fig. 18

qui est donc théoriquement indéfinie. En pratique, la «tension-limite» signifie une tension à laquelle on admet encore un petit pourcentage de contournement

comme telle, car l'écart jusqu'au 100 % d'amorçages ou de contournements demeure théoriquement considérable.

Au point de vue mathématique, la notion de la dispersion est nettement définie comme écart quadratique moyen  $\sigma$ , qui correspond à l'écart  $\pm$  des tensions 84 % et 16 %, par rapport à la moyenne.

ment une droite, les écarts des valeurs mesurées individuelles par rapport à la moyenne dépendent selon Gauss d'un pur hasard. Pratiquement, cela signifie qu'aucune variable n'a échappé aux obser-

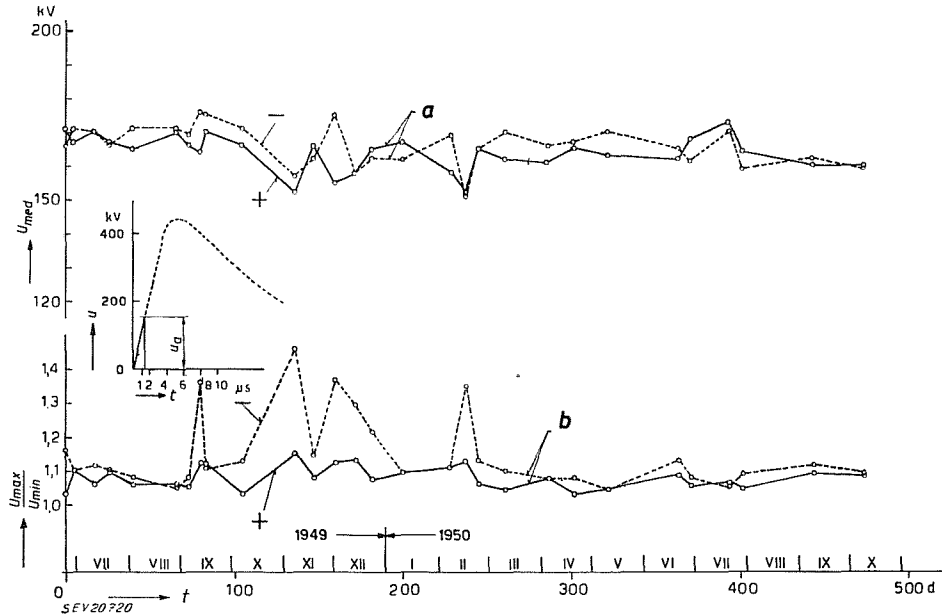


Fig. 20  
Tension d'amorçage mesurée du parafoudre n° 6, fabrication B, non ramenée à la densité normale de l'air  
Désignations, comme pour la fig. 18

La courbe de Gauss montre immédiatement que, par exemple, l'écart des valeurs 5 % et 95 % par rapport à la moyenne est environ deux fois plus grand que l'écart-type  $\sigma$  (exactement 1,965 fois).

Au sujet de la cause de la dispersion, il y a lieu de remarquer ce qui suit:

Par contre, lorsque la courbe de distribution dans le réseau de probabilité n'est pas rectiligne, une variable non contrôlée exerce, sur la valeur mesurée, des influences systématiques qui ne se modifient pas pendant la durée des observations. Il peut s'agir, par exemple, de l'influence exercée

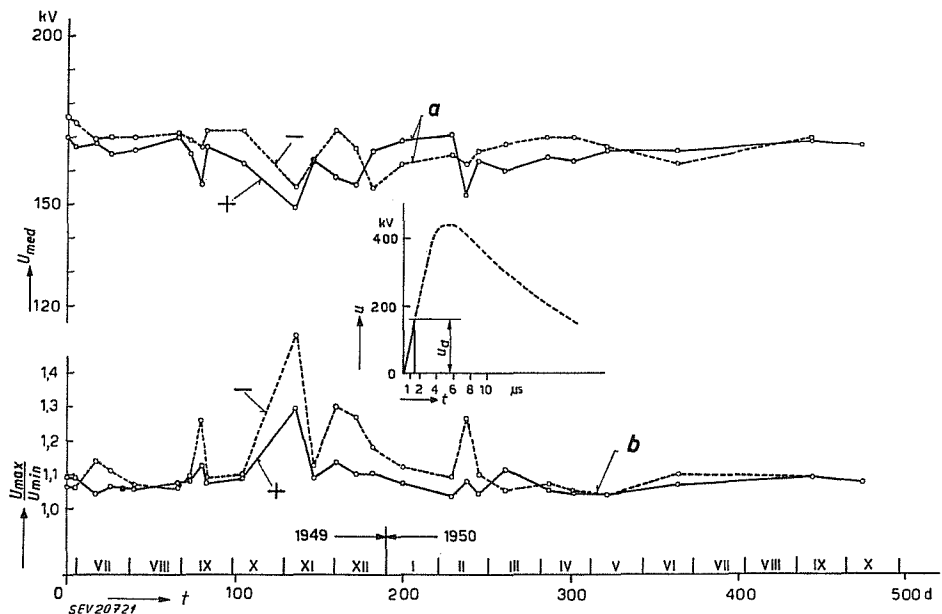


Fig. 21  
Tension d'amorçage mesurée du parafoudre n° 7, fabrication B, non ramenée à la densité normale de l'air  
Désignations, comme pour la fig. 18

Lorsque les courbes de distribution se rapprochent beaucoup de la courbe de Gauss, ce qui se constate le plus simplement au fait que, sur le réseau de probabilité, la courbe devient sensible-

par l'humidité de l'air, qui n'a pas été corrigée parce que son importance, surtout pour des courbements dans le front des tensions de choc, n'est pas définie et qu'elle est certainement beau-



coup moins grande que pour une tension de choc complète. Elle ne peut donc produire que des erreurs de quelques pour cent. La comparaison avec les données météorologiques, qui ont été soigneuse-

ce jour-là. De même, la moyenne positive de la série 31 de l'éclateur à tiges est restée basse, ce même jour, bien qu'aucun cheminement dû à l'humidité n'ait pu se produire. En revanche, la tension négative

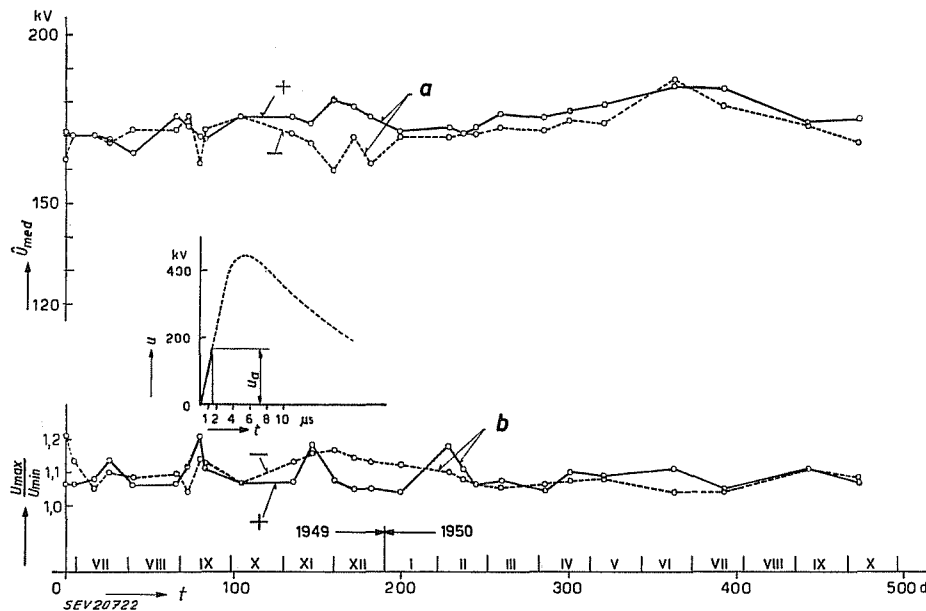


Fig. 22

Tension d'amorçage mesurée du parafoudre n° 11, fabrication C, non ramenée à la densité normale de l'air  
Désignations, comme pour la fig. 18

ment notées et figurent dans les tableaux I à III, n'a pas permis d'élucider cette question, ni pour le matériel d'installations intérieures, ni pour celui d'installations en plein air. Cependant, pour les séries n°s 3 et 31, une influence de la pluie paraît être manifeste, car les moyennes de ces deux séries sont

tive n'a pas présenté d'influence de ce genre. Mais si la pluie exerce une légère influence sur la tension de contournement des isolateurs, cette influence est pratiquement négligeable pour le matériel qui a été l'objet de ces essais. Cependant, le fait que la dispersion des parafoudres à éclateur est d'autant

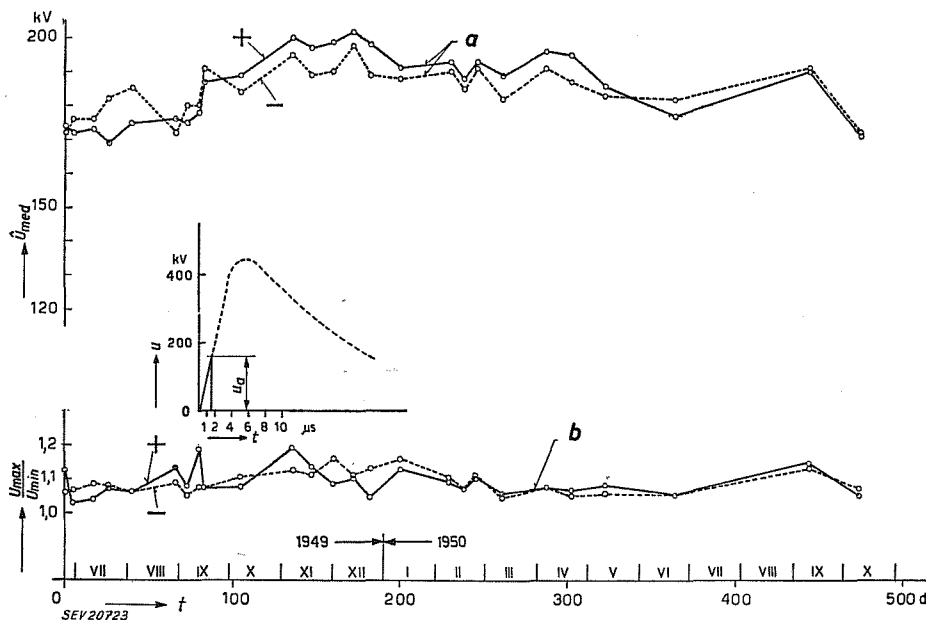


Fig. 23

Tension d'amorçage mesurée du parafoudre n° 12, fabrication C, non ramenée à la densité normale de l'air  
Désignations, comme pour la fig. 18

particulièrement basses. Il est néanmoins intéressant de constater que la tension de contournement des traversées pour installations intérieures, montées dans le local d'essais fermé, était également basse

plus faible que l'étanchéité de ces parafoudres est plus parfaite, tend à prouver que les conditions atmosphériques exercent une certaine influence sur les distances disruptives et les éclateurs à l'air libre.

Jusqu'à présent, nous ignorons toutefois quelle est la nature de ces influences.

Les résultats de ces mesures sont groupés sur les fig. 49 à 53.

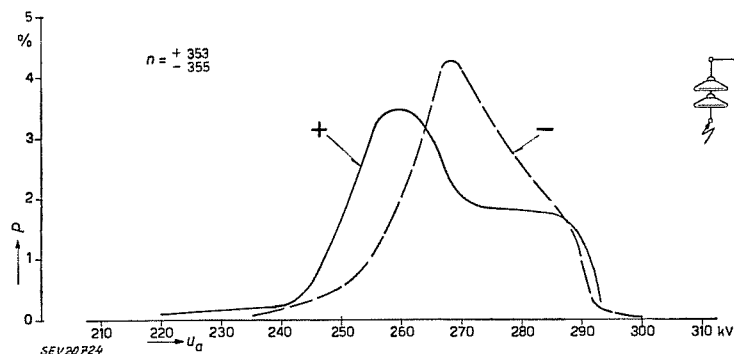


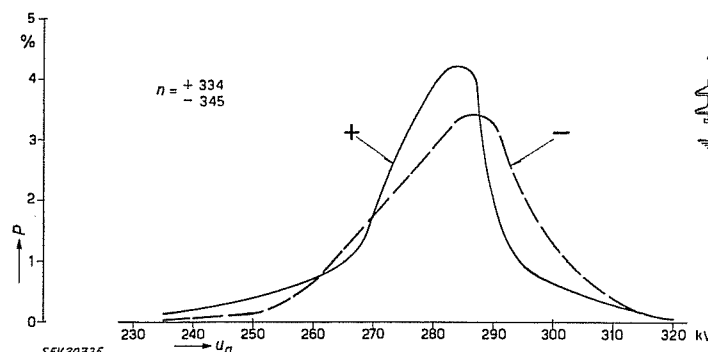
Fig. 24  
Courbe de fréquence des tensions de contournement de l'isolateur de suspension représenté sur la fig. 1  
 $n$  Nombre de mesures;  $u$  Tension de contournement;  $p$  Fréquence en %, par kV d'intervalle de tension

## 6. Influence de la raideur de la tension de choc sur les tensions de contournement et d'amorçage

Afin de se rendre compte si la raideur de la tension de choc exerce une influence sur la grandeur

Les courbes de la fig. 49 concernent l'isolateur-support, l'éclateur à tiges (distance disruptive 260 mm), ainsi qu'un éclateur symétrique à pointe et plaque, qui n'avait pas été soumis à la série d'es-

Fig. 25  
Courbe de fréquence des tensions de contournement de l'isolateur-support représenté sur la fig. 2  
Désignations, comme pour la fig. 24



des tensions de contournement et d'amorçage, les objets en essai ont été soumis à des tensions de choc de différentes raideurs de front. On a également

sais de durée et qui devait permettre d'obtenir une même tension pour les deux polarités de chocs, grâce à un couplage antiparallèle de deux disposi-

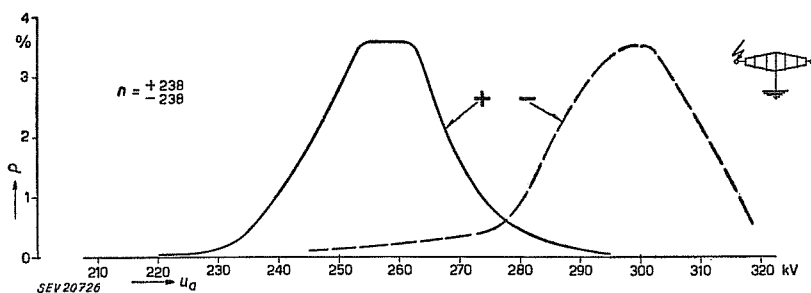


Fig. 26  
Courbe de fréquence des tensions de contournement de la traversée représentée sur la fig. 3  
Désignations, comme pour la fig. 24

attaché de l'importance à des fronts relativement plats, de l'ordre de grandeur de quelques kV/ $\mu$ s.

tions identiques. Pour des chocs positifs, on a pu obtenir une courbe relativement nette, qui indique

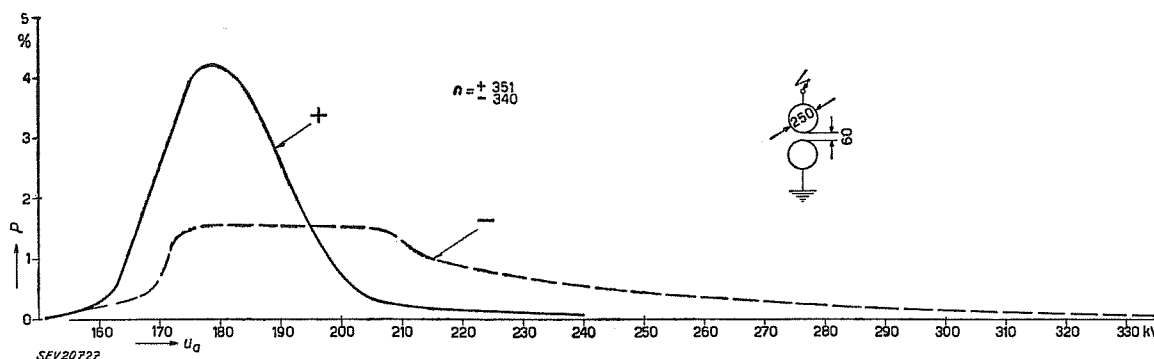


Fig. 27  
Courbe de fréquence des tensions d'amorçage de l'éclateur à sphères de 250 mm de diamètre, représenté sur la fig. 4  
Désignations, comme pour la fig. 24

l'accroissement usuel de la tension d'amorçage avec la raideur du front. En revanche, pour des chocs négatifs, les points de mesures des dispositions non symétriques présentent une dispersion telle, qu'il n'est pas possible de dessiner une courbe.

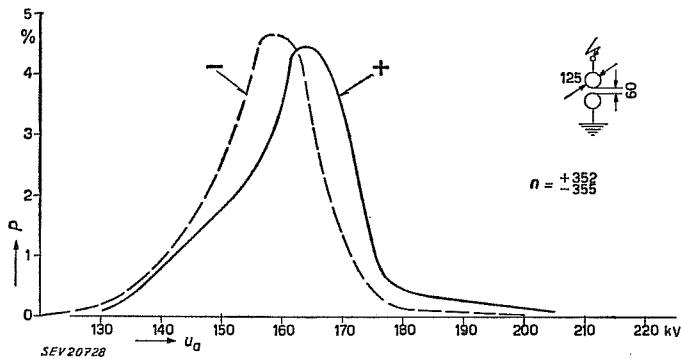


Fig. 28

Courbe de fréquence des tensions d'amorçage de l'éclateur à sphères de 125 mm de diamètre (non nettoyées), à axe vertical, représenté sur la fig. 5

Désignations, comme pour la fig. 24

Les courbes de la fig. 50 montrent que l'influence de la raideur du front est beaucoup plus faible pour l'éclateur à sphères. Tandis que les valeurs pour les sphères de 125 mm sont peu dispersées, celles des sphères de 250 mm s'étendent sur tout un champ de

persion de la raideur n'explique pas la grande dispersion des valeurs de mesures constatée lors des essais de durée.

## 7. Importance des mesures pour la coordination des isolaments avec la protection contre les surtensions

Il va de soi que l'exploitation d'installations à haute tension exige que la protection contre les sur-

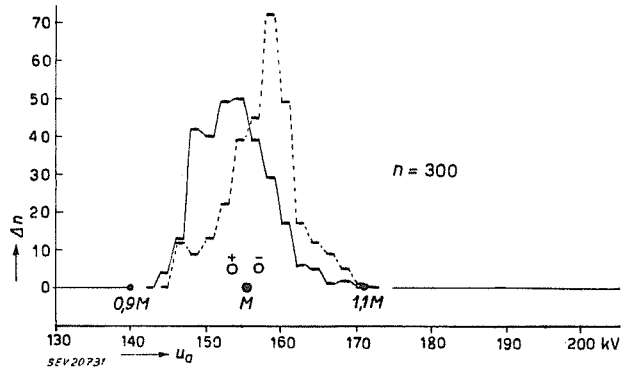


Fig. 31

Courbe de fréquence des tensions d'amorçage du parafoudre n° 1, fabrication A

$u$  Tension d'amorçage;  $\Delta$  Nombre de mesures par intervalle de tension (2 kV);  $n$  Nombre total de mesures

— Chocs positifs

- - - Chocs négatifs

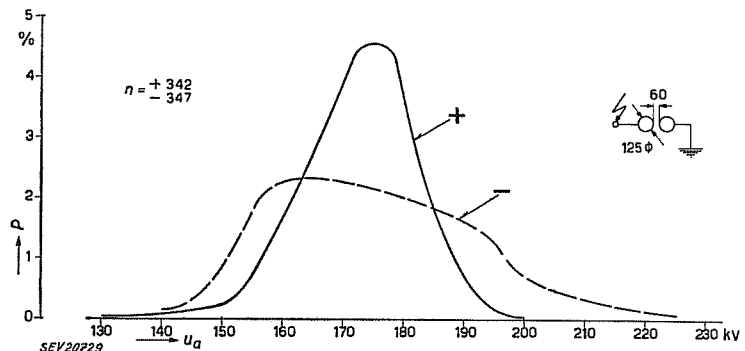
○ Moyenne positive et négative de la tension d'amorçage

● Moyenne générale de la tension d'amorçage

Fig. 29

Courbe de fréquence des tensions d'amorçage de l'éclateur à sphères de 125 mm de diamètre (nettoyées), à axe horizontal, représenté sur la fig. 5

Désignations, comme pour la fig. 24



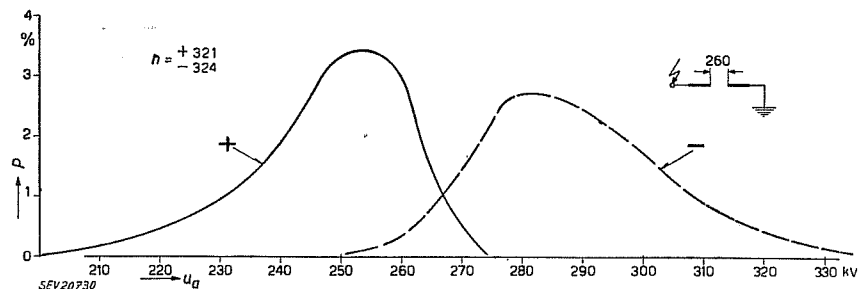
dispersion. Les résultats concordent avec ceux des essais de durée, bien que pour cette unique série de mesures les valeurs extrêmes soient moins élevées. Les fig. 51 à 53 indiquent, pour les parafoudres des trois fabrications, que l'influence de la raideur de

tensions soit *constamment* efficace. Cela nécessite évidemment une gradation permanente des tensions d'amorçage des parafoudres avec les tensions de contournement des isolations. La question se pose donc de savoir comment la *différence* de ces deux ten-

Fig. 30

Courbe de fréquence des tensions d'amorçage de l'éclateur à tiges représenté sur la fig. 6

Désignations, comme pour la fig. 24



la tension de choc sur la tension d'amorçage est du même ordre que pour l'éclateur à sphères, voire un peu moins grande. Si l'on considère que, lors des essais de durée, la raideur ne varie que très peu, aussi bien entre les chocs individuels qu'entre les séries de mesures, on doit reconnaître que la dis-

sions varie avec le temps. En effet, si les tensions d'amorçage des parafoudres se modifiaient exactement de la même façon et de la même valeur que les tensions de contournement des isolateurs à protéger, la dispersion des moyennes serait pratiquement sans importance et il suffirait de tenir compte, pour

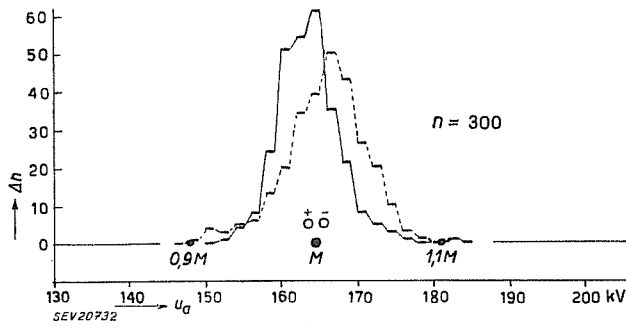


Fig. 32  
Courbe de fréquence des tensions d'amorçage du parafoudre  
n° 2, fabrication A  
Désignations, comme pour la fig. 31

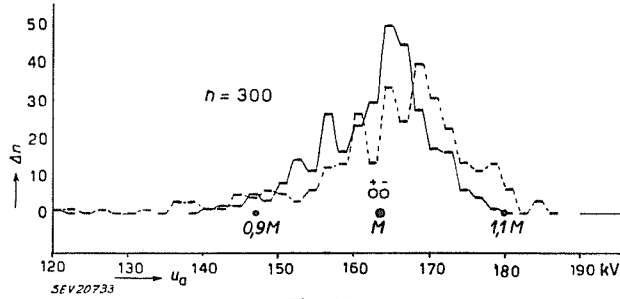


Fig. 33  
Courbe de fréquence des tensions d'amorçage du parafoudre  
n° 6, fabrication B  
Désignations, comme pour la fig. 31

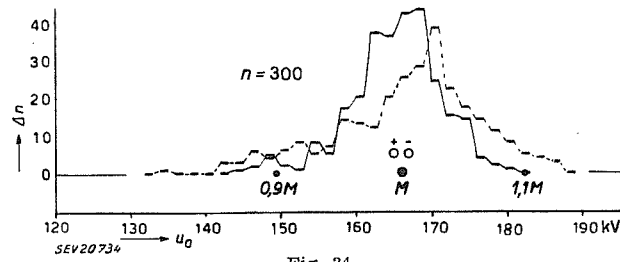


Fig. 34  
Courbe de fréquence des tensions d'amorçage du parafoudre  
n° 7, fabrication B  
Désignations, comme pour la fig. 31

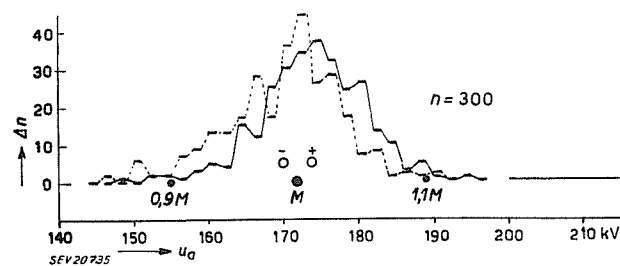


Fig. 35  
Courbe de fréquence des tensions d'amorçage du parafoudre  
n° 11, fabrication C  
Désignations, comme pour la fig. 31

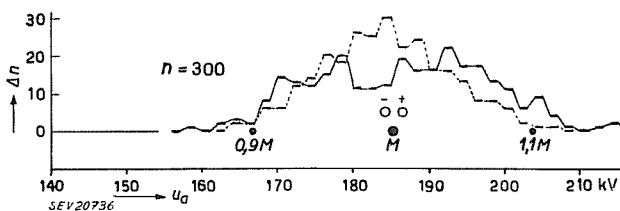


Fig. 36  
Courbe de fréquence des tensions d'amorçage du parafoudre  
n° 12, fabrication C  
Désignations, comme pour la fig. 31

la gradation, de la dispersion mesurable à un moment quelconque à l'intérieur de ces séries. Ce n'est malheureusement pas le cas. Les figures montrent que la variation des moyennes n'est déjà pas la même pour les différents isolateurs. D'autre part, les seuls parafoudres qui soient vraiment utilisables actuellement sont ceux dont l'éclateur est hermétique à l'air et dont la dispersion paraît ne dépendre que très peu des influences atmosphériques. Si l'on tient également compte du fait que la tension résiduelle des parafoudres ne varie pas avec le temps,

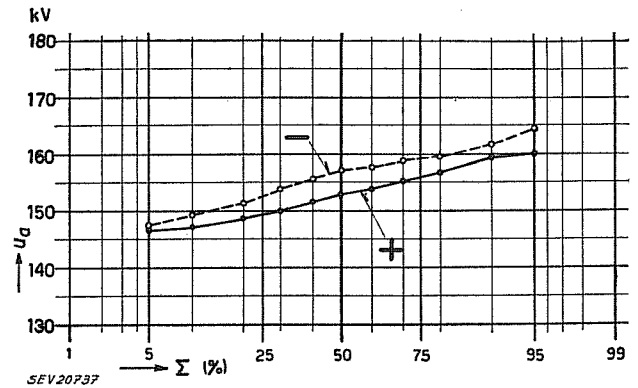


Fig. 37  
Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre  
n° 1, fabrication A, reportée sur un réseau de probabilité  
Fréquence cumulée en pour cent de l'amorçage  
à des tensions inférieures à la valeur d'ordonnée  
u Tensions d'amorçage

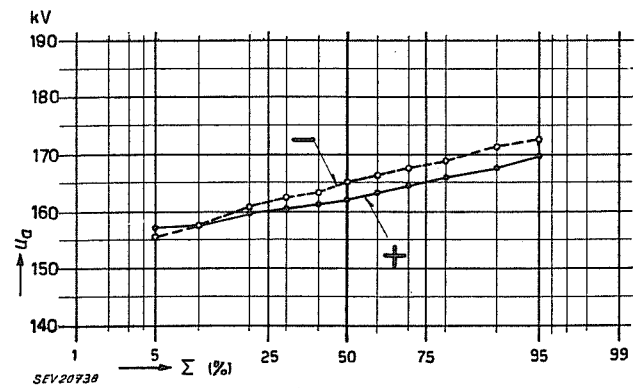


Fig. 38  
Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre  
n° 2, fabrication A, reportée sur un réseau de probabilité  
Désignations, comme pour la fig. 37

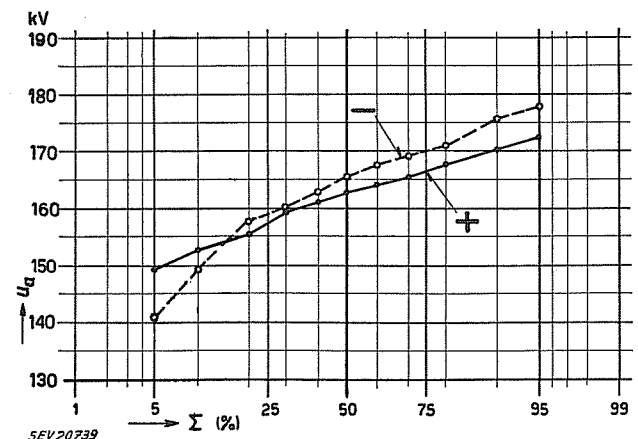


Fig. 39  
Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre  
n° 6, fabrication B, reportée sur un réseau de probabilité  
Désignations, comme pour la fig. 37

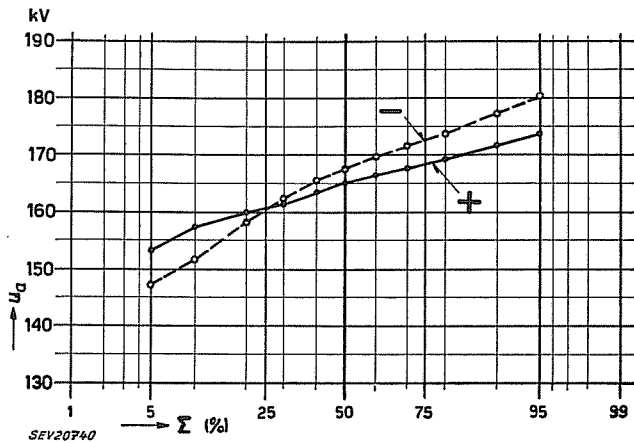


Fig. 40

Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre n° 7, fabrication B, reportée sur un réseau de probabilité  
Désignations, comme pour la fig. 37

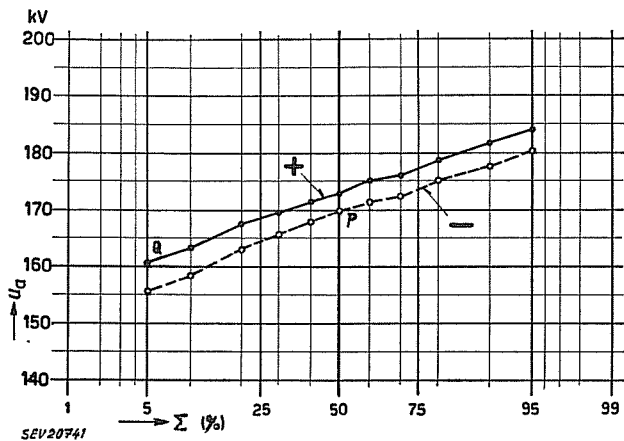


Fig. 41

Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre n° 11, fabrication C, reportée sur un réseau de probabilité  
P Tension 50 % d'amorçage, pour chocs négatifs  
Q Tension 5 % d'amorçage, pour chocs positifs  
Autres désignations, comme pour fig. 37

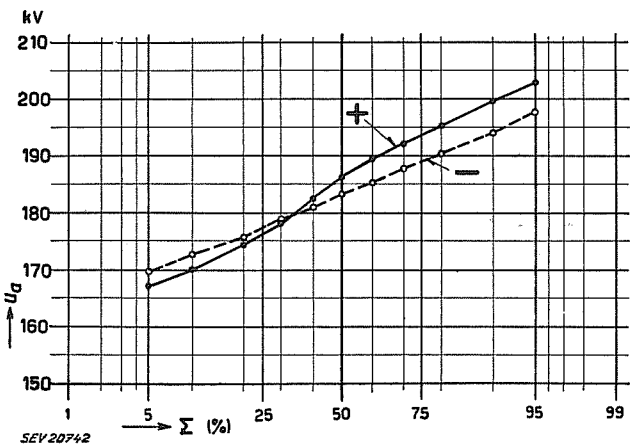


Fig. 42

Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre n° 12, fabrication C, reportée sur un réseau de probabilité  
Désignations, comme pour la fig. 37

il devient évident que l'on doit considérer, lors de la détermination de la gradation, la dispersion totale des tensions de contournement des isolateurs, c'est-à-dire celle qui résulte d'une densité variable

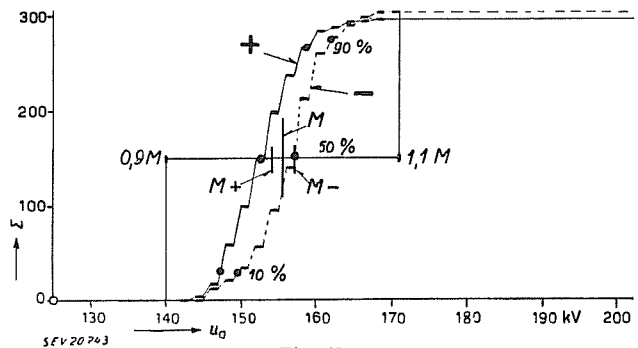


Fig. 43

Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre n° 1, fabrication A, représentée en coordonnées linéaires  
u Tension d'amorçage; Fréquence cumulée de l'amorçage à des tensions inférieures à la valeur d'abscisse  
M+ Moyenne positive de la tension d'amorçage  
M- Moyenne négative de la tension d'amorçage  
M Moyenne générale de la tension d'amorçage

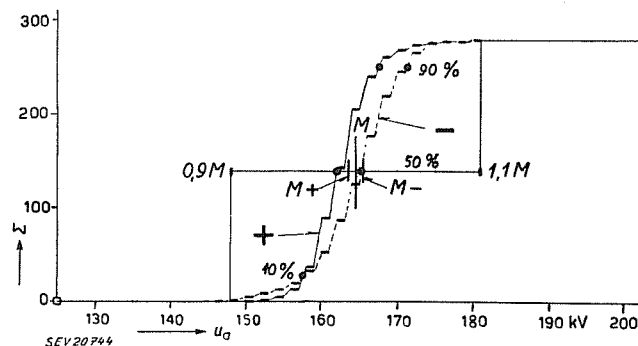


Fig. 44

Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre n° 2, fabrication A, représentée en coordonnées linéaires  
Désignations, comme pour la fig. 43

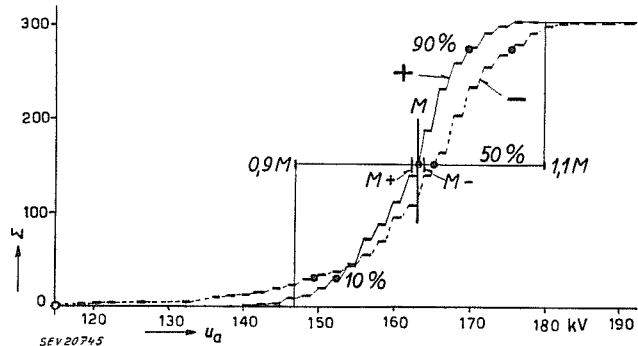


Fig. 45

Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre n° 6, fabrication B, représentée en coordonnées linéaires  
Désignations, comme pour la fig. 43

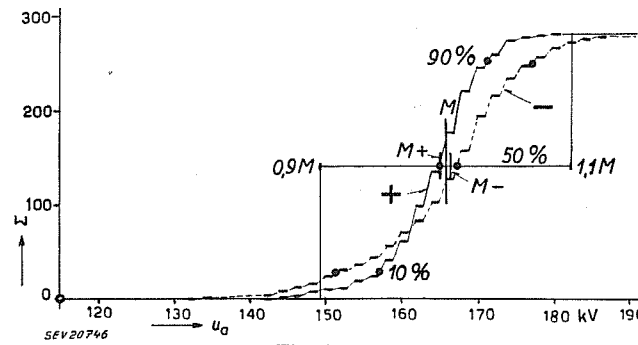


Fig. 46

Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre n° 7, fabrication B, représentée en coordonnées linéaires  
Désignations, comme pour la fig. 43

de l'air. Les courbes des isolateurs et des éclateurs à l'air libre indiquent cependant toujours les valeurs réduites.

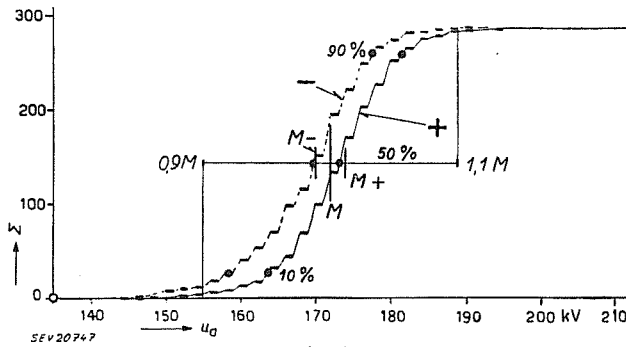


Fig. 47

Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre n° 11, fabrication C, représentée en coordonnées linéaires  
Désignations, comme pour la fig. 43

En pratique, la protection ne sera jamais absolument complète, car on admet toujours un certain pourcentage de défaillances, dans la mesure où cela

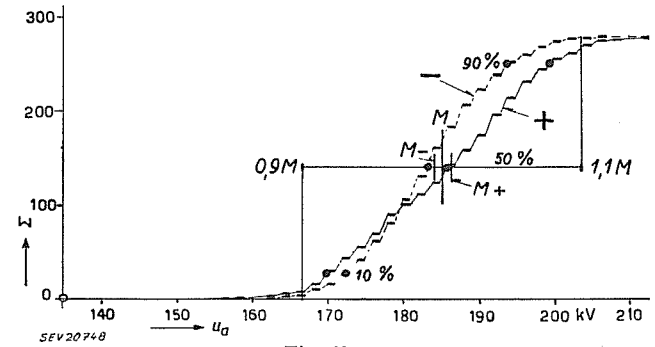
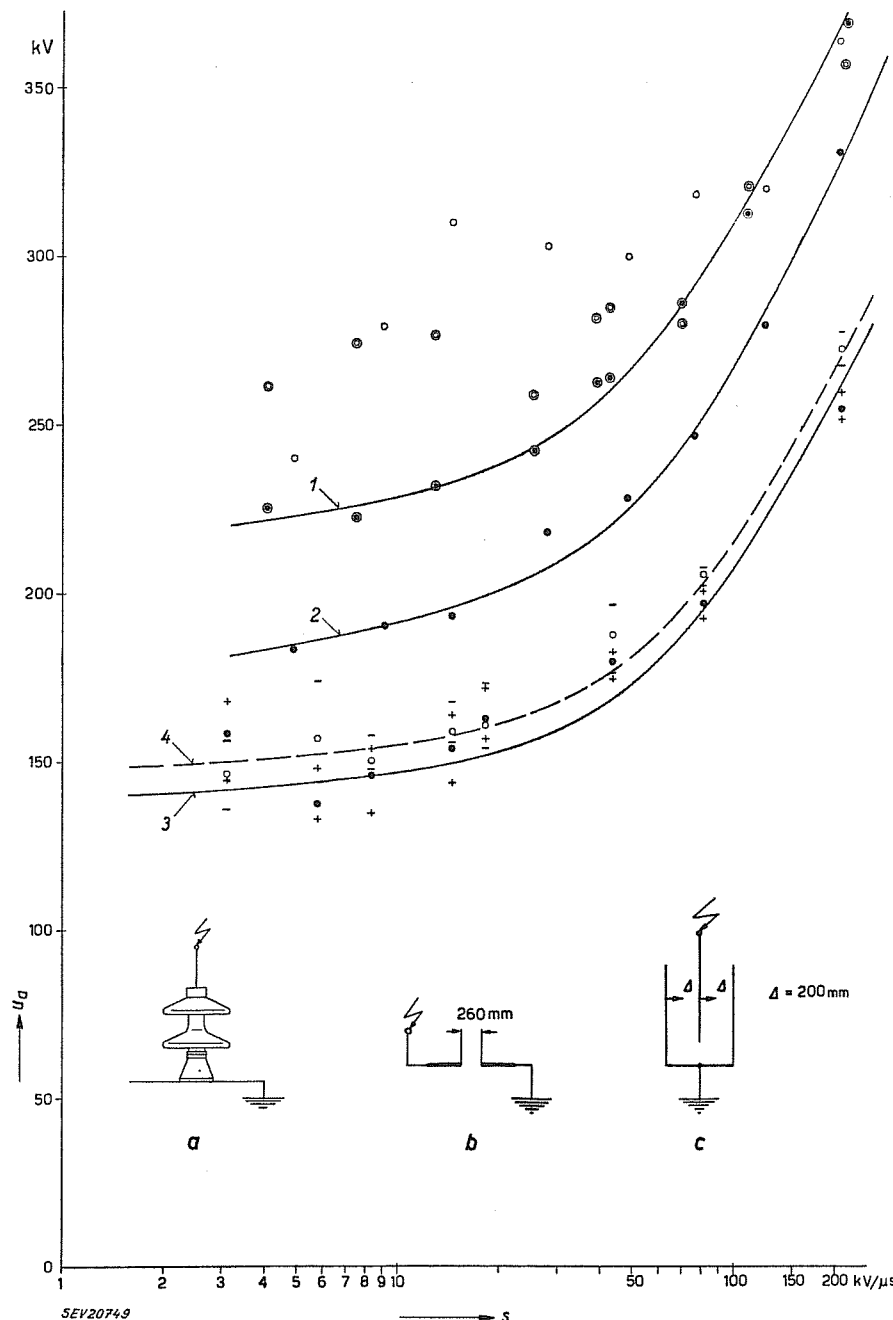


Fig. 48

Fréquence cumulée des tensions d'amorçage du parafoudre n° 12, fabrication C, représentée en coordonnées linéaires  
Désignations, comme pour la fig. 43



se justifie au point de vue économique. La gradation devra donc assurer une protection optimum, mais non parfaite.

En ce qui concerne la protection contre les surtensions d'une installation à haute tension, il s'agit en outre de savoir comment varie avec le temps un *grand complexe d'isolateurs* de tous genres. Il y a lieu de remarquer tout d'abord que les essais de choc dans des installations ont montré que la tension 50 % de contournement de *n* isolateurs identiques est de 10 à 15 % plus faible que celle d'un tel isolateur essayé individuellement.

Ce résultat se comprend aisément, si l'on considère le problème du point de vue de la théorie des pro-

Fig. 49

Tension de contournement de l'isolateur-support et tension d'amorçage de deux éclateurs, en fonction de la raideur de la tension de choc

*u* Tension de contournement ou d'amorçage

*s* Raideur de la tension de choc

a) Isolateur-support, selon fig. 2

• Points de mesure pour choc positif (courbe 1)

○ Points de mesure pour choc négatif

b) Éclateur à tiges, selon fig. 6

• Points de mesure pour choc positif (courbe 2)

○ Points de mesure pour choc négatif

c) Éclateur symétrique à point et plaque

• Points de mesure pour choc positif (courbe 3)

○ Points de mesure pour choc négatif (courbe 4)

babilités. Cela est nécessaire, car la notion de tension 50 % est déjà une notion de probabilité, qui signifie que la tension de contournement présente une dispersion et que, selon sa valeur, la fréquence des contournements peut varier de 0 à 100 %. Si, par exemple, deux isolateurs en parallèle sont soumis à une tension de choc qui provoquerait 50 % de contournements et 50 % de non-contournements à l'un des deux isolateurs, s'il était seul, on

babilité  $p_n$  de l'amorçage d'un nombre  $n$  d'isolateurs :

$$1 - p_1 = \sqrt[n]{1 - p_n} \text{ ou } p_1 = 1 - \sqrt[n]{1 - p_n} \quad (4)$$

Lorsque, par exemple,  $n = 100$  et  $p_n = 50 \%$ , on a :

$$p_1 = 1 - \sqrt[100]{0,5} = 1 - 0,993 \approx 0,007.$$

Pour une tension 50 % de l'installation, on a dans ce cas une tension 0,7 % d'un isolateur. Pratiquement, cela signifie que la tension 50 % d'une instal-

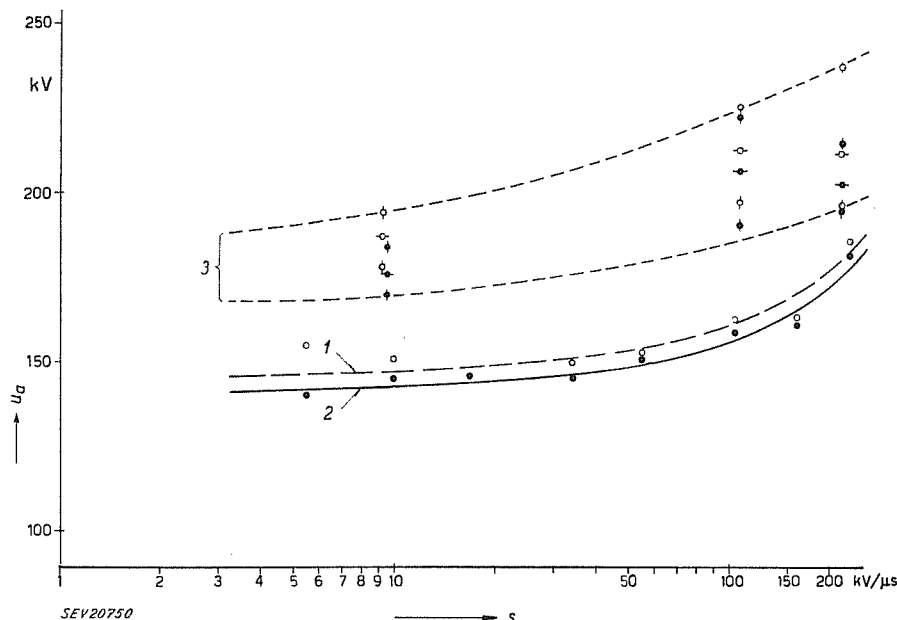


Fig. 50  
Tension d'amorçage de deux éclateurs à sphères, en fonction de la raideur de la tension de choc

- s Raideur de la tension de choc  
u Tension d'amorçage  
a) Éclateur à sphères de 125 mm  $\phi$ , selon fig. 5  
• Points de mesure pour choc positif (courbe 2)  
○ Points de mesure pour choc négatif (courbe 1)  
b) Éclateur à sphères de 250 mm  $\phi$ , selon fig. 4  
♦ Points de mesure pour choc positif  
◇ Points de mesure pour choc négatif  
3 Domaine de dispersion

a affaire à la tension 50 % de contournement d'un isolateur. Si les deux isolateurs sont soumis ensemble à cette même tension de choc, l'un d'eux s'amorcera pour le 50 % des chocs. Mais, pour le 50 % restant des chocs, il est encore possible que l'autre isolateur s'amorce. Dans ce cas, le 25 % seulement de tous les chocs ne donnera pas lieu à un amorçage, ni au premier, ni au second isolateur. Ainsi donc, la tension 50 % d'un isolateur est la tension 75 % de deux isolateurs. La probabilité  $p_n$  de l'amorçage à un isolateur quelconque d'un groupe de  $n$  isolateurs en parallèle s'exprime par l'équation <sup>2)</sup> :

$$p_n = 1 - (1 - p_1)^n \quad (3)$$

où  $p_1$  est la probabilité d'un amorçage pour un isolateur soumis individuellement à une tension de choc,

$p_n$  la probabilité d'un amorçage, lorsque  $n$  isolateurs sont soumis simultanément à une tension de choc,

$n$  le nombre d'isolateurs soumis ensemble à une tension de choc.

$p_n$  est toujours plus grand que  $p_1$ . Lorsque, par exemple,

$n = 100$  et  $p_1 = 50 \%$ , on a par exemple

$$p_n = 1 - 0,5^{100} \approx 1 - 10^{-30} \approx 1,0$$

Pratiquement, chaque choc provoquera un amorçage. Inversement, la probabilité  $p_1$  de l'amorçage d'un isolateur soumis individuellement à une tension de choc peut être déterminée d'après la pro-

lation donne lieu à moins de 1 % d'amorçages à un isolateur, lorsque celui-ci est essayé individuellement. Cette valeur se rapproche de la « tension-limite ».

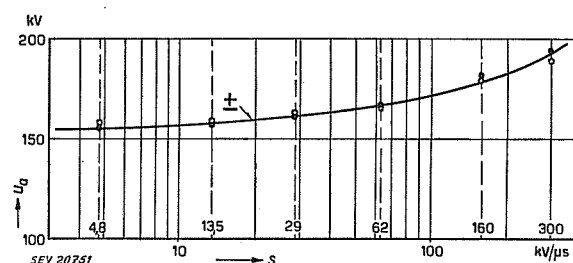


Fig. 51  
Tension d'amorçage  $u$  du parafoudre n° 2, fabrication A, en fonction de la raideur  $s$  de la tension de choc

Si nous considérons, d'autre part, la dispersion de la tension d'amorçage d'un groupe d'isolateurs identiques, c'est-à-dire d'une « installation », on peut admettre physiquement qu'en partant, par exemple, de la tension 50 % de l'installation la probabilité d'un amorçage à l'un quelconque des  $n$  isolateurs en parallèle augmente immédiatement lorsque la tension de choc s'élève, c'est-à-dire que la dispersion de la valeur 50 % jusqu'à la valeur 100 % est manifestement plus faible que pour un isolateur considéré individuellement. Inversement, lorsque la tension de choc est réduite, la probabilité d'un amorçage quelconque diminue tout d'abord rapidement, mais il est difficile de se rendre compte de ce qui se passe ensuite. Les courbes de probabilité calculées à l'aide des équations ci-dessus et qui figu-

<sup>2)</sup> voir Rapport CIGRE 1952, n° 322, de H. Rohrer.

rent dans le rapport à la CIGRE déjà mentionné, sont intéressantes, car elles montrent que pour  $n > 1$  le réseau de probabilité ne renferme plus de droite rectiligne, même lorsque pour  $n = 1$  une telle ligne existe conformément à la distribution de Gauss. En concordance avec l'exposé qui précède, les courbes figurant dans ce rapport montrent que la différence des tensions 95 % ou 99 % est plus grande que la différence des tensions 5 % ou 1 %, lorsque l'on compare un isolateur individuel avec un groupe d'isolateurs en parallèle. Etant donné que, pour la coordination, il s'agit d'éviter des contournements d'isolateurs, c'est la tension-limite des isolateurs qui intéresse avant tout. Or, précisément pour cette tension-limite, il est malheureusement très difficile de dire si la dispersion est plus faible que pour un isolateur individuel.

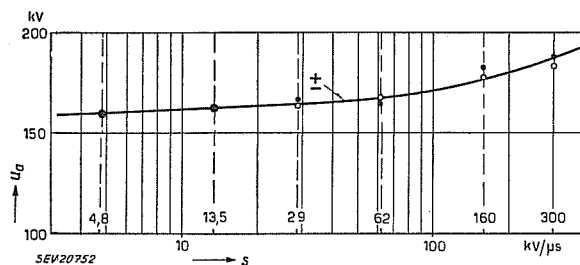


Fig. 52

Tension d'amorçage  $u$  du parafoudre n° 7, fabrication B, en fonction de la raideur  $s$  de la tension de choc

Nous n'avons pas à discuter, ici, de ces questions intéressantes au point de vue théorique. Il suffit pratiquement de dire que, dans l'installation, la tension de contournement est nettement plus faible que celle d'un isolateur individuel, mais que, d'autre part, la dispersion de l'installation n'est théoriquement pas plus grande que pour un isolateur individuel. Il serait sans doute intéressant et utile de procéder à des essais de dispersion directement pour tout un groupe d'isolateurs identiques, au lieu d'isolateurs individuels. Les essais que nous venons de décrire donnent cependant une idée des résultats que l'on peut escompter.

Nos essais prouvent à nouveau combien il importe que l'intervalle de tension entre le niveau de protection et le niveau d'isolement des distances disruptives dans l'air soit suffisamment grand, pour

obtenir une coordination dans les installations et combien le problème est plus simple lorsqu'il s'agit, par exemple, uniquement de protéger un transformateur contre les surtensions, en le munissant d'un parafoudre.

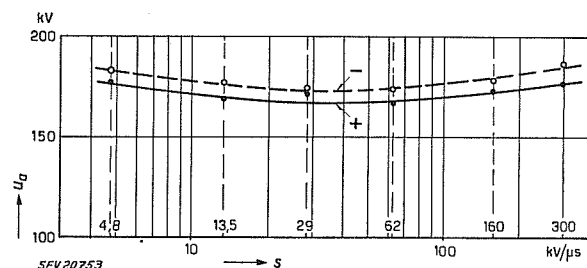


Fig. 53

Tension d'amorçage  $u$  du parafoudre n° 12, fabrication C, en fonction de la raideur  $s$  de la tension de choc

L'intervalle de tension de 25 % entre les tensions 50 % du niveau de protection et du niveau d'isolement dans l'air, recommandé par les Règles de l'ASE pour la coordination des isolements, ne tient pas compte de l'abaissement de la tension de contournement dû à la présence de plusieurs isolateurs en parallèle, ni de la dispersion dans le temps des valeurs moyennes. Cela provient du fait qu'à l'époque de l'établissement de ces Règles, on ignorait tout de ces phénomènes, qui n'ont été connus qu'à la suite d'essais de choc d'installations complètes, à l'aide de l'installation mobile de la FKH. Ces essais ont été extrêmement utiles pour la réalisation pratique de la coordination dans des installations existantes, car ils ont eu lieu dans les conditions atmosphériques régnant au moment des mesures et tenaient automatiquement compte de toutes les influences dues aux emplacements et aux dispositions des diverses parties de l'installation.

Les mesures que nous venons d'exposer ont été exécutées dans la Station d'essais de Gösigen de la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension, par MM. E. Seylaz et H. Peter, qui ont également procédé au dépouillement d'une grande partie des résultats et auxquels nous réitérons ici nos vifs remerciements.

Adresse de l'auteur:

Dr ès sc. techn. K. Berger, professeur, ingénieur chargé des essais de la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), 301, Seefeldstrasse, Zurich 8.