

Zeitschrift:	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber:	Association suisse des électriciens
Band:	27 (1936)
Heft:	6
Artikel:	Résultats des mesures effectuées au cours des orages de 1934/35
Autor:	Berger, K.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1057491

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 14.01.2026

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:

Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens
et de l'Union des Centrales Suisse d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:

S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVII^e Année

N^o 6

Vendredi, 20 Mars 1936

Résultats des mesures effectuées au cours des orages de 1934/35.¹⁾

Par K. Berger, Zurich.

621.316.93

Faisant suite aux articles publiés les années précédentes, ce rapport indique les résultats des mesures effectuées au cours des orages en 1934 et 1935, à la demande de la KOK, sur une ligne moderne à très haute tension. Les mesures des surtensions à l'aide d'oscillographes cathodiques ont été complétées par des mesures de la grandeur et de la vitesse de variation des courants engendrés par la foudre dans les pylônes atteints par les décharges atmosphériques. Les bases de la protection contre les surtensions ont pu être ainsi confirmées à plusieurs points de vue, surtout à celui des exigences auxquelles doivent satisfaire les appareils de protection contre les surtensions, des prises de terre des pylônes de lignes à haute tension, et des contraintes par choc que subissent les isolateurs de lignes aériennes lors des décharges atmosphériques. A côté, l'auteur a mis au point une méthode permettant de déterminer l'endroit avarié des lignes à haute tension; il démontre qu'on peut l'appliquer en principe. Enfin, on a mesuré pour la première fois les vitesses de variation du courant engendré par la foudre dans les objets atteints, dont on a déduit des règles pour le dimensionnement et la disposition des paratonnerres de bâtiments.

Als Fortsetzung der in den Vorjahren veröffentlichten Aufsätze wird über die im Auftrag der KOK in den Jahren 1934 und 1935 an einer modernen Höchstspannungsleitung gewonnenen Resultate der Gewitterforschung berichtet. Die Messungen der Ueberspannungen mit Kathodenstrahl-Oszillographen sind ergänzt worden durch Messungen der Grösse und Aenderungsgeschwindigkeit der Blitzströme in den vom Einschlag betroffenen Masten. Die Grundlagen des Ueberspannungsschutzes konnten dadurch in mehrfacher Hinsicht gefestigt werden, nämlich bezüglich der an Ueberspannungsleiter zu stellenden Anforderungen, bezüglich der Masterdungen von Hochspannungsleitungen und bezüglich der Stossbeanspruchung von Freileitungsisolatoren bei Blitzschlag. Als Nebenprodukt ergab sich eine Methode der Fehlerortsbestimmung auf Hochspannungsleitungen, deren prinzipielle Brauchbarkeit im Aufsatz erwiesen wird. Ferner lassen sich aus den erstmalig gemessenen Aenderungsgeschwindigkeiten des Blitzstromes in den vom Einschlag betroffenen Objekten Bemessungsregeln für die Anordnung der Gebäude-Blitzableiter entnehmen.

I. Description des lignes observées.

Pour la mesure des surtensions d'origine atmosphérique, on a disposé en 1934 et 1935 des deux lignes suivantes:

a) La ligne à très haute tension qui traverse le massif du Gothard. Cette ligne transporte pour l'instant du courant triphasé à 150 kV, mais les pylônes sont toutefois prévus pour un service à 300 kV au moins. Dans ce qui suit, on la désignera par «ligne du Gothard». Elle part de la centrale de Piottino à Lavorgo²⁾ et aboutit par-dessus les Alpes au poste de couplage d'Amsteg.

Construite en 1932 par la S. A. Motor-Columbus, cette ligne est du type le plus moderne de ligne en haute montagne³⁾. Les trois conducteurs câblés sont disposés sur un plan horizontal, pour tenir compte des oscillations dues aux charges de glace et de neige. L'écartement normal entre deux conducteurs est de 9 m. Afin d'assurer une sécurité de service aussi élevée que possible en temps d'orage, la mise à la terre de tous les pylônes a été faite avec beaucoup de soin. Toutefois, du fait qu'un grand nombre de pylônes sont fixés directement dans le

roc (gneiss et granit), il n'a pas toujours été possible de réaliser une prise de terre à faible résistance. En vue d'améliorer la mise à la terre, un tronçon particulièrement exposé à la foudre a été équipé dès le début d'un câble enfoui dans le sol («contrepoids»), de 760 m, reliant d'une façon continue les pieds des pylônes 15 à 18. Toute la ligne est munie en outre de deux câbles de terre. Afin de tenir compte de la contrainte mécanique considérable à laquelle est soumise une ligne en haute montagne, l'isolation est constituée par des chaînes d'isolateurs Motor. Les chaînes normales comportent 4 éléments, celles des tronçons dont la terre est mauvaise comportent par contre 6 éléments en série. Toutes les chaînes sont munies d'armatures pare-arcs. Pour obtenir dès le service actuel à 150 kV le même écartement entre conducteurs et câbles de terre que celui prévu par la suite pour le service à tension plus élevée, les chaînes des pylônes d'alignement ont été suspendues à des barres de fer dont la longueur correspond à celle des isolateurs qui seront ajoutés ultérieurement.

Les figures 1 et 2 montrent deux types de pylônes caractéristiques.

Le tableau I indique l'ordre de grandeur des résistances de la prise de terre des pylônes, mesurées de la manière habituelle à l'aide d'un pont Norma, lors de la construction de la ligne en août et septembre 1932.

¹⁾ Voir les rapports pour 1930, Bull. ASE 1931, p. 421; 1931, Bull. ASE 1932, p. 289; 1932/33, Bull. ASE 1934, p. 213.

²⁾ Bull. ASE 1932, p. 661.

³⁾ Voir p. ex. la brochure de la S. A. Motor-Columbus, à Baden, et également Bull. ASE 1932, p. 672.

Tableau I.

Résistance de la prise de terre d'un pylône	< 10 Ω	10 à 19 Ω	20 à 39 Ω	40 à 100 Ω	> 100 Ω
Nombre de pylônes .	62	52	42	9	2

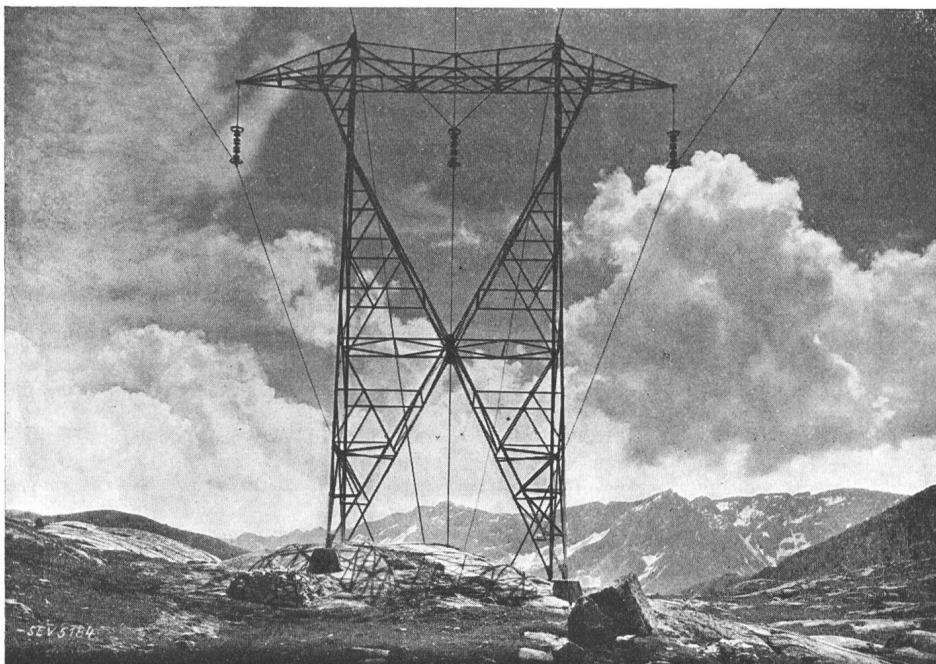


Fig. 1.
Pylône d'alignement de la ligne du Gothard à 150 kV,
avec chaînes de suspension à 4 isolateurs.

Vu le caractère extrêmement montagneux de la région traversée, ces prises de terre peuvent être considérée comme excellentes.

A son extrémité sud, la ligne du Gothard est prolongée par une ligne double d'environ 8,2 km jusqu'à Bodio, où elle est alimentée exceptionnellement par un transformateur de 15 000 kVA. Au nord, dans le poste de couplage d'Amsteg, un groupe transformateur-générateur de 13 000 kVA est raccordé passagèrement à la ligne du Gothard par une dérivation de quelques 100 m. Depuis Amsteg, la ligne se dirige vers la sous-station de Rathausen distante de 57,7 km, en empruntant les pylônes communs à 4 lignes mo-

nophasées étrangères à 66 kV avec trois conducteurs. La ligne bifurque ensuite en deux branches à 150 kV, l'une allant vers Bickigen, l'autre vers Siebnen. Durant la période d'observation, seule la

ligne de Siebnen était enclenchée et ceci d'une façon intermittente. La majeure partie de l'énergie est transformée à Rathausen à 50 kV; les perturbations atmosphériques en aval de ce transformateur sont donc sans effet pour les surtensions dans la ligne à 150 kV, comme on a pu le constater nettement. Il est donc inutile de décrire le reste du réseau.

Le schéma de la ligne du Gothard est représenté sur la figure 3, avec indication des longueurs des lignes et des puissances des transformateurs.

b) La seconde ligne d'essai est *une ligne à 80 kV* allant de Lavorgo par Bodio à la frontière italienne (Ponte Tresa) vers la sous-station italienne de Veveri. Cette ligne sera désignée dans la suite par «*ligne sud*».

Le tronçon Lavorgo-Bodio occupe les mêmes pylônes que le prolongement de la ligne du Gothard

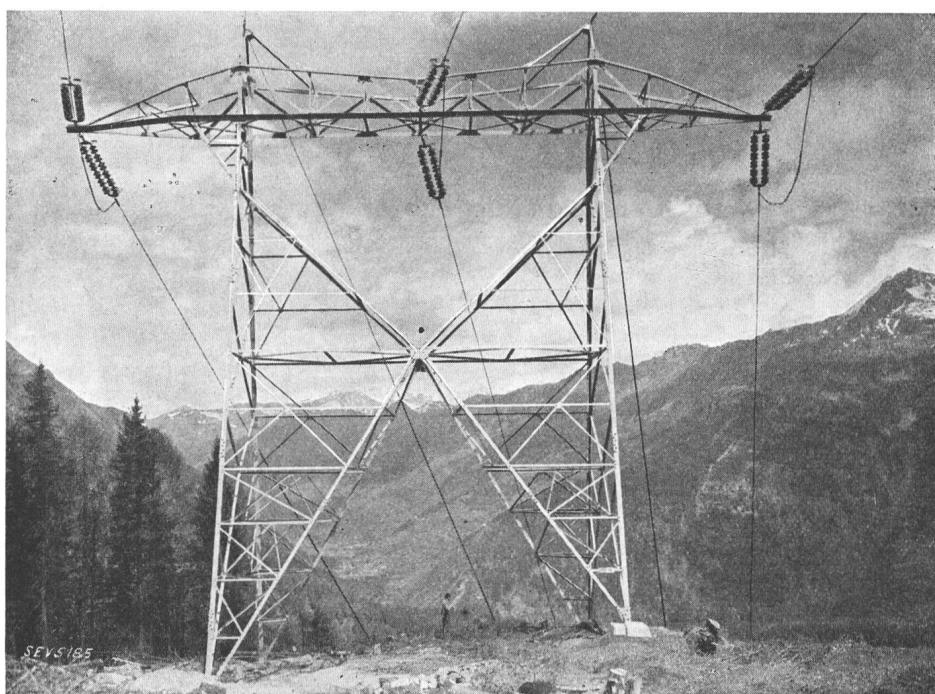


Fig. 2.
Pylône d'angle et d'arrêt de la ligne du Gothard à 150 kV,
avec doubles chaînes de suspension à 6 isolateurs.

à 150 kV et il est également isolé pour une tension de service de 150 kV (chaînes à 4 isolateurs Motor pour les pylônes d'alignement et chaînes à 5 isolateurs pour les pylônes d'arrêt). La partie prin-

pale de la ligne sud à 80 kV (Bodio-Veveri) est de construction plus ancienne; elle est isolée par des chaînes à 6 éléments OB (Bodio-Castione), à 3 éléments «Motor» (Reazzino-Rivera) et à 2 isolateurs

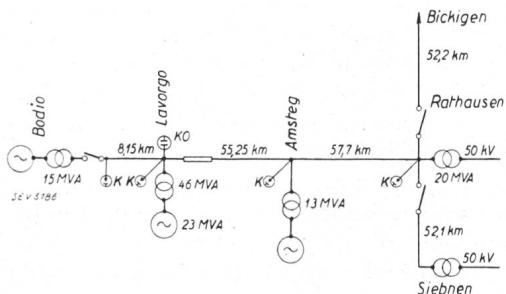


Fig. 3.

Schéma de principe du réseau observé à 150 kV.

K Postes de klydonographes.

KO Poste des oscilloscopes cathodiques.

— Tronçon équipé d'un câble de sol.

«Motor» sur le reste du tronçon suisse de la ligne. Elle n'est pas munie d'armatures pare-arcs, mais d'un câble de terre.

Le schéma de cette ligne sud à 80 kV est représenté sur la figure 4, où sont indiquées les longueurs

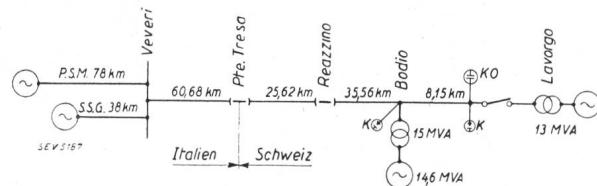


Fig. 4.

Schéma de principe du réseau observé à 80 kV.

K Postes des klydonographes.

KO Poste des oscilloscopes cathodiques.

des lignes et les puissances des transformateurs. A Lavorgo, la ligne était toujours ouverte lors des essais au cours des orages, car le transformateur installé sert uniquement de réserve.

II. Description des dispositifs de mesure.

a) Dispositifs de mesure de la ligne du Gothard.

Pour étudier les effets de la foudre, on a utilisé les dispositifs de mesure suivants:

- 1^o L'oscillographe cathodique tripolaire de l'ASE, logé comme les années précédentes dans un wagon de chemin de fer⁴⁾;
- 2^o Un klydonographe dans chacune des stations de Bodio, Lavorgo, Amsteg et Rathausen;
- 3^o Des barrettes d'acier pour mesurer la valeur maximum des courants engendrés par la foudre, conformément au système préconisé par la Société allemande d'étude des installations à très hautes tensions;
- 4^o Des dispositifs pour mesurer la raideur maximum (di/dt)_{max} des courants engendrés par la foudre dans les pylônes.

1^o L'oscillographe cathodique (OC) est celui qui a été utilisé les années précédentes. Toutefois, les

tubes de décharge ont été transformés pour les rendre plus robustes. En évitant l'emploi de tubes en verre ou en porcelaine, on est arrivé à pouvoir maintenir les oscilloscopes entièrement montés (et

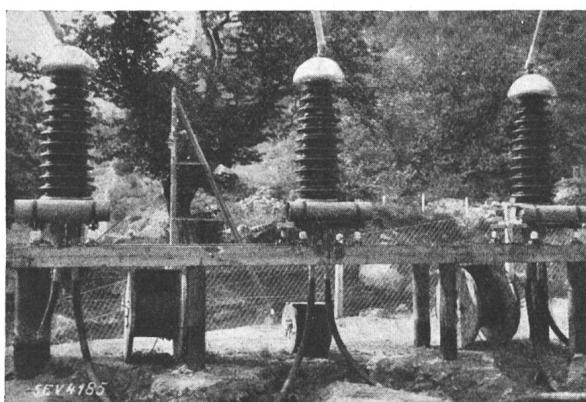


Fig. 5.

Vue des trois diviseurs de tension à 150 kV à Lavorgo.

par conséquent sous vide) même pendant les trajets en chemin de fer. En outre, la durée de la cathode a été accrue d'environ 12 fois.

Les diviseurs de tension étaient comme autrefois des diviseurs combinés selon Gábor⁵⁾. La partie haute tension est constituée par une résistance en mannite (env. 11 000 Ω) et un câble à huile d'env. 25 m avec boîte d'extrémité pour 150 kV⁶⁾; la par-

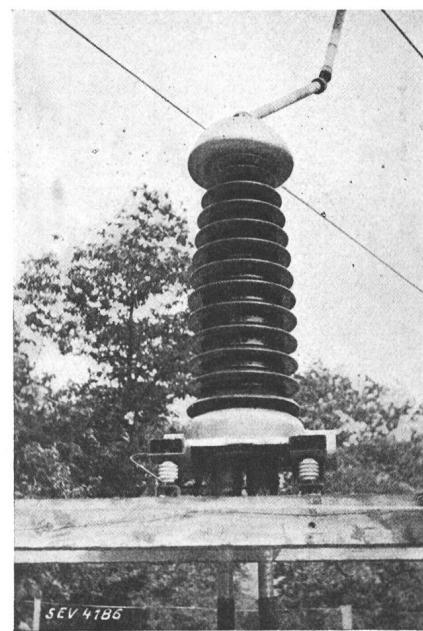


Fig. 6.

Vue d'une boîte d'extrémité de câble à 150 kV à Lavorgo, avec résistance de mannite raccordée (en haut).

tie basse tension comporte un condensateur au papier imprégné et une résistance métallique. Le câble de retardement interposé est un câble spécial sous plomb de 300 m.

⁵⁾ Bull. ASE 1933, p. 330.

⁶⁾ P. E. Schneeberger: Bull. ASE 1934, p. 341.

⁴⁾ Bull. ASE 1934, p. 214.

Les figures 5 et 6 montrent la partie haute tension du diviseur de tension à 150 kV, dont le câble à huile a été obligamment prêté par les Câbleries de Brougg S. A. et monté par leurs soins.

2^o Les *klydonographes* sont raccordés à la ligne à 150 kV à l'aide de diviseurs de tension capacitatifs spéciaux, afin d'éviter tout phénomène d'effluve, même lors d'une surtension. Dans ce but, on a adopté des électrodes constituées par des tores en

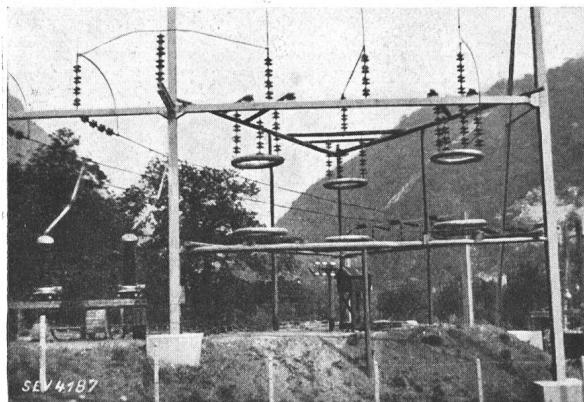


Fig. 7.

Poste de klydonographes pour 150 kV à Lavorgo.
(On aperçoit à gauche les diviseurs de tension pour l'OC.)

tôle d'environ 1700 mm de diamètre et de 200 mm d'épaisseur.

Les diviseurs de tension pour les klydonographes sont nettement visibles sur les figures 7 et 8, ainsi que la caisse en bois renfermant les klydonographes.

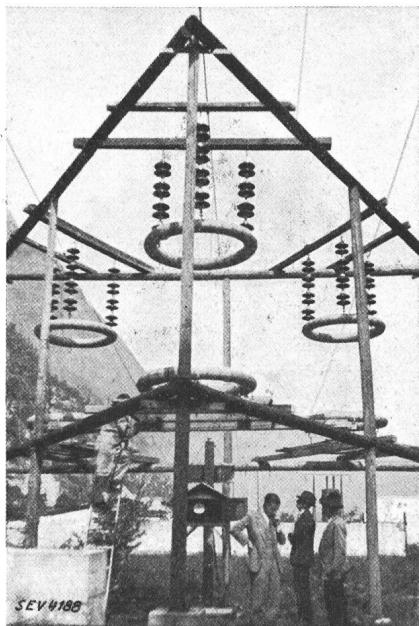


Fig. 8.

Poste de klydonographes pour 150 kV à Bodio.

Pour les mesures à 80 kV, les diviseurs de tension sont constitués par des tores un peu plus petits, en tuyau à gaz.

3^o Pour la description des *barrettes d'acier* destinées à mesurer les valeurs maxima des courants

engendrés par la foudre, on peut consulter les travaux allemands⁷). La méthode est due à Töpler, qui a déjà calculé il y a environ 30 ans la valeur maximum du courant dû à la foudre en se basant sur l'intensité de magnétisation que subit par exemple le basalte sous l'effet de décharges atmosphériques. Cette méthode a été mise au point par la Société allemande d'étude des installations à très hautes tensions, qui, par une subdivision suffisamment fine de la barrette d'acier chromé, a obtenu que la magnétisation du faisceau de fils par le bref courant magnétisant (engendré par la foudre) soit pratiquement identique à celle due au courant continu. Pour déceler approximativement les maxima du courant dû à la foudre, cette méthode s'est avérée plus simple et meilleur marché que la méthode

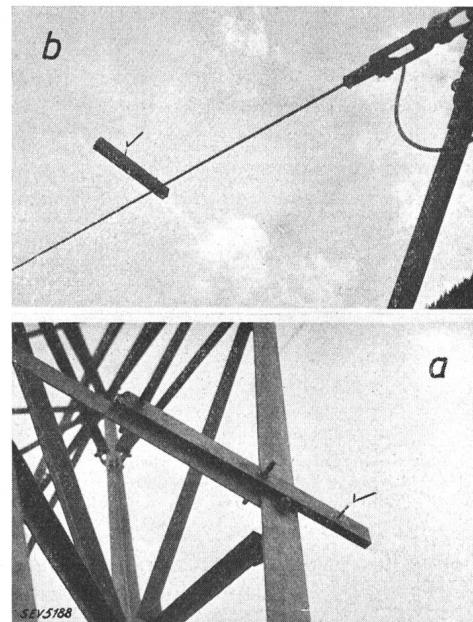


Fig. 9.

- a Fixation d'une barrette d'acier pour mesurer le courant engendré par la foudre dans le pylône.
b Fixation d'une barrette d'acier pour mesurer le courant engendré par la foudre dans le câble de terre.

de l'éclateur avec prise de terre auxiliaire⁸) utilisée par nous depuis 1931, car elle n'exige pas de prise de terre auxiliaire. Cette méthode est devenue très utile pour déterminer la valeur approximative du courant dû à la foudre, bien qu'elle présente malheureusement le désavantage de ne plus permettre d'observations concluantes en cas de décharges atmosphériques répétées. Durant les périodes orageuses de 1934 et 1935, 100 pylônes de la ligne du Gothard ont été munis au total de 400, resp. 600 barrettes d'acier, dont une partie a servi à la mesure du courant s'écoulant à la terre et l'autre à celle du courant dans les câbles de terre. La figure 9a montre la disposition d'une barrette contre un pylône, la figure 9b la fixation à un câble de terre.

⁷) Grünwald, ETZ 1934, p. 505. ATM V 327-2 (déc. 1935).

⁸) Bull. ASE 1934, p. 227.

4^e Des dispositifs ont été utilisés pour mesurer la vitesse maximum d'accroissement du courant dû à la foudre dans les pylônes affectés par les décharges. Cette valeur est intéressante à trois points de vue: Elle détermine en premier lieu le genre de prise de terre des pylônes le mieux approprié à la protection contre les décharges atmosphériques, car une prise de terre excellente pour le courant continu, ne l'est pas nécessairement pour les courants de choc.

En second lieu, la raideur maximum du courant dû à la foudre multipliée par la résistance de la prise de terre du pylône (valeur de choc) donne la raideur maximum de la tension de choc aux isolateurs de la ligne. La connaissance de cette raideur maximum de la tension de choc qui se présente pratiquement lors de décharges atmosphériques est

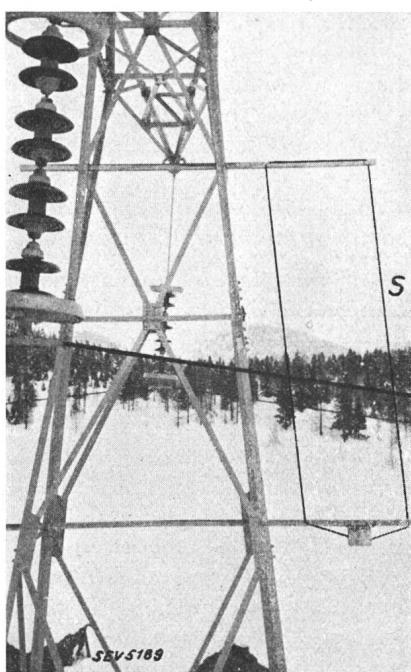


Fig. 10.

Boucle de fil avec dispositif de mesure de la raideur du courant dû à la foudre, montée sur un pylône de la ligne du Gothard.

d'une remarquable importance pour déterminer la sécurité des isolateurs contre les tensions de choc.

Enfin, la raideur du courant engendré par la foudre dans les pylônes intéresse directement la valeur des tensions induites magnétiquement dans les conducteurs câblés⁹⁾.

La méthode mise au point dans ce but consiste à relever la tension induite par le courant dû à la foudre dans une boucle de fil adossée au pylône, sous forme de figures de Lichtenberg enregistrées par deux éclateurs à pointe et plaque blindés, branchés en parallèle et dirigés en sens inverses. La figure 10 montre la disposition de la boucle induite montée contre un pylône de la ligne du Gothard, ainsi que le petit coffret situé au-dessous et renfermant le dispositif de mesure de la raideur. En 1934

⁹⁾ V. Aigner, Surtensions induites par la foudre et leur relation avec le claquage en retour. ETZ 1935, p. 497.

et 1935, la ligne du Gothard possédait 50 dispositifs de ce genre; 130 autres étaient répartis sur d'autres lignes. La figure 11 montre la position des dis-

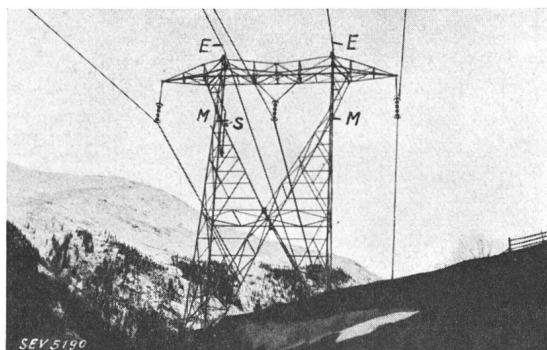


Fig. 11.

Vue d'un pylône d'alignement équipé de barrettes en acier et de dispositifs de mesure de la raideur.

E Barrettes d'acier pour la mesure du courant engendré par la foudre dans les câbles de terre.

M Barrettes d'acier pour la mesure du courant engendré par la foudre dans les deux montants du pylône.

S Boucle de fil avec dispositif de mesure de la raideur.

positifs de mesure du courant engendré par la foudre dans un pylône.

La tension E_0 induite dans la boucle S (voir fig. 12) est donnée par l'équation fondamentale suivante, en partant des courants dans le pylône:

$$E_0 = \sum_K M_K \frac{\partial i_K}{\partial t} = M_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + M_3 \frac{\partial i_3}{\partial t} + M_4 \frac{\partial i_4}{\partial t}$$

où M_K désigne les inductivités mutuelles des trajets de courant dans le fer du pylône et de la boucle S, i_K les courants inductifs dans le fer du pylône. Pour

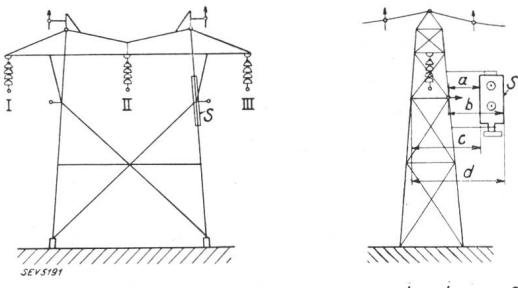


Fig. 12.

Calcul de la raideur du courant engendré par la foudre dans le pylône, à l'aide du dispositif de mesure de la raideur.

S Boucle de fil induite, avec dispositif de mesure de la raideur.

i_1, i_2, i_3, i_4 Courants inductifs engendrés par la foudre dans les fers d'angle du pylône.

le cas de la ligne du Gothard, la série ne comporte que 4 membres, car à la hauteur de la boucle S il n'y a que les 4 fers d'angle qui conduisent des courants en sens vertical. Le plan de la figure montre en outre que l'effet d'induction des deux courants i_3 et i_4 sur S peut être négligé en première approximation par rapport à i_1 et i_2 , car leur champ magné-

tique ne traverse la boucle qu'en très faible partie. On obtient ainsi la formule approchée:

$$E_0 \simeq M_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M_2 \frac{\partial i_2}{\partial t}$$

Du fait du faible écartement des deux fers d'angle 1 et 2 et des nombreuses liaisons transversales au-dessus de la section intéressant la boucle S, et d'autre part du fait que la répartition du courant engendré dans la section du pylône par la décharge atmosphérique a lieu non pas surtout selon les résistances ohmiques des liaisons par vis, mais bien plus selon les caractéristiques inductives et capacitives du trajet du courant (par suite du caractère de choc de la décharge atmosphérique), on ne commet donc pas une grande erreur en posant $i_1 = i_2$ et

$$E_0 \simeq [M_1 + M_2] \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{i_1 + i_2}{2} \right) = \\ l \cdot \ln \left(\frac{b \cdot d}{a \cdot c} \right) \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2)$$

où l est la longueur en cm des côtés de la boucle parallèles aux fers d'angle du pylône, a et c sont les distances du côté le plus rapproché, b et d celles de l'autre côté de la boucle par rapport aux fers d'angle 1 et 2.

Pour les pylônes de la ligne du Gothard, on obtient ainsi le rapport numérique moyen:

$$E_0 \simeq 330 \cdot \ln \left(\frac{144 \cdot 376}{44 \cdot 276} \right) \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2) \\ \text{ou } \frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2)_{\max} \simeq 2,05 E_0$$

La décharge atmosphérique provoque également dans les fers d'angle 3 et 4 des courants qui sont du même ordre de grandeur que ceux dans les fers d'angle 1 et 2, du fait des nombreuses liaisons transversales en-dessus et en-dessous de la boucle de mesure. On obtient par conséquent une estimation de la raideur du courant total i_M engendré dans le pylône par la décharge atmosphérique en doublant les valeurs:

$$\frac{\partial}{\partial t} (i_1 + i_2 + i_3 + i_4)_{\max} \equiv \left(\frac{\partial i_M}{\partial t} \right)_{\max} \simeq 4,1 E_0$$

Il y a lieu de remarquer en outre que le calcul de la raideur du courant dû à la foudre donne des résultats plus exacts quand il s'agit de sections de pylônes plus simples et plus ramassées, que dans le cas des pylônes extrêmement grands utilisés sur la ligne du Gothard en haute montagne. En considérant la grandeur de la figure de Lichtenberg, on a donc une dimension directe pour la raideur du courant engendré dans le pylône par la foudre. Afin d'obtenir exactement la même sensibilité des dispositifs de mesure de la raideur pour les vitesses d'accroissement du courant positives et négatives, chaque appareil comporte deux éléments de mesure identiques branchés en parallèle en positions opposées.

Les figures de Lichtenberg qui proviennent de chocs de tension se succédant à de brefs intervalles peuvent se distinguer nettement les unes des autres par suite des croisements des branches des arcs. Il est donc possible de reconnaître les décharges multiples en considérant les diverses figures. A ce point de vue, cette méthode est donc plus avantageuse que celle des barrettes d'acier qui permettent de constater la valeur *maximum* du courant. Par contre, ces dispositifs de mesure de la raideur ne permettent pas de constater immédiatement (sans avoir préalablement développé la pellicule photographique insérée) si une figure s'est formée ou non, c'est-à-dire si une décharge atmosphérique s'est présentée ou non. La méthode des barrettes d'acier pour la mesure du maximum de courant et la méthode des dispositifs de mesure de la raideur maximum se complètent donc. Lors des contrôles des barrettes d'acier à la boussole sur la ligne du Gothard, on a toujours remplacé et examiné non seulement les barrettes magnétisées, mais également les dispositifs de mesure de la raideur prévus sur les pylônes.

III. Fréquence des surtensions atmosphériques à un point donné du réseau.

Les valeurs maxima des surtensions mesurées à l'oscillographe cathodique durant les périodes d'orages en 1934 et 1935 sont représentées graphiquement sur la figure 13. On entend dans ce cas par surtension la brève variation de la tension d'une phase contre la terre, qui paraît être superposée à la tension alternative momentanée de cette phase, c'est-à-dire la variation de tension provoquée par la foudre est superposée à la tension de service momentanée. L'addition de ces surtensions mesurées et de l'amplitude de la tension alternative de service donnerait donc une image trop défavorable de la contrainte totale, car la plupart des surtensions ne se présentent pas exactement à l'instant où la tension de service atteint sa valeur maximum, mais sont réparties selon une loi des probabilités sur toute la période de la tension alternative. En revanche, les courbes donnent une image directe de la fréquence des surtensions d'origine atmosphérique de diverses valeurs sur les lignes fortement isolées. L'abscisse représente l'amplitude en kV de la variation de tension mesurée; l'ordonnée indique le nombre des tensions mesurées, dont la valeur atteint ou dépasse celle d'abscisse.

En comparant les divers diagrammes, on constate que les surtensions sur le réseau à 150 kV ont été relativement peu nombreuses en été 1934. Ceci provient en premier lieu du fait que, dans la région du Gothard, l'été 1934 a été très peu orageux et que la ligne se trouvait hors service durant la seconde moitié de juillet, de sorte que les mesures n'ont pu avoir lieu que sur une partie de la ligne. D'autre part, on constate que les surtensions de moyenne valeur sont remarquablement nombreuses dans la ligne sud à 80 kV, durant l'été 1935, comparativement à la ligne du Gothard à 150 kV.

Ce phénomène s'explique par le fait que les surtensions dans la ligne à 80 kV ont été mesurées à une station de tête et qu'elles représentent par conséquent des surtensions réfléchies, tandis qu'au point de mesure de la ligne à 150 kV, celle-ci est traversante, de sorte que dans ce dernier cas on avait théoriquement mesuré directement les amplitudes

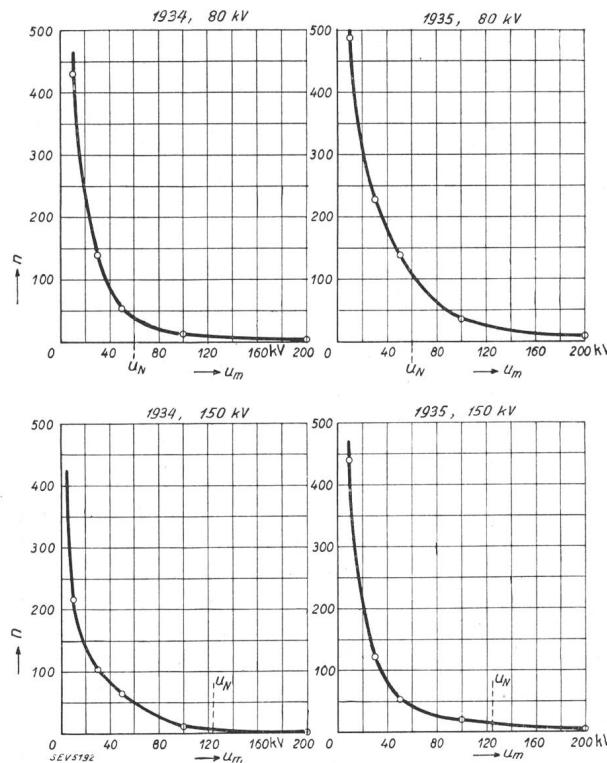


Fig. 13.

Diagrammes de la fréquence des surtensions atmosphériques de différentes valeurs, établis d'après les mesures faites à l'oscillographe cathodique de Lavorgo.

80 kV: station terminus; 150 kV: station de passage.

u_N Amplitude de la tension étoilée normale de service.

Abscisse u_m Valeur de la surtension due à la foudre et superposée à la tension alternative de service momentanée.

Ordonnée n Nombre des surtensions dont la valeur atteint ou dépasse la valeur d'abscisse.

des ondes incidentes. A vrai dire, cette différence est pratiquement supprimée, lorsque la durée des ondes dépasse le temps nécessaire au parcours des ondes de Lavorgo à Bodio et retour (env. 55 μ s). Dans ce cas les ondes incidentes et les ondes réfléchies se superposent, même si le décalage est de 55 μ s. Un exemple de ce genre sera décrit plus loin, au chapitre V, cas a). Cela signifie que la distance jusqu'à l'extrémité de la ligne à 150 kV est déjà trop courte pour que l'on puisse considérer Lavorgo comme une station purement traversante. Par contre, la durée des surtensions élevées est généralement trop brève pour que la superposition d'une onde d'aller et retour ait encore une importance pratique (voir chapitre V, cas a), de sorte que la queue de ligne Lavorgo-Bodio constitue une protection efficace pour Lavorgo.

En comparant les diagrammes de fréquence avec ceux des années précédentes¹⁰⁾, on constate que les surtensions atmosphériques de valeurs moyennes sont plus fréquentes dans la ligne du Gothard et

dans la ligne sud, que dans le cas de la ligne à 80 kV observée précédemment; les observations s'étendaient dans les deux cas sur une période de deux années.

Les surtensions mesurées à l'aide des *klydonographes* sont relevées sur les figures 14 et 15 sous forme de diagrammes de fréquence, ceci pour les centrales de Lavorgo et de Bodio, les enregistrements ayant eu lieu à ces deux endroits pour 80 et 150 kV. L'exactitude de ces diagrammes est sensiblement moindre que celle des diagrammes obtenus par les mesures à l'oscillographe cathodique (fig. 13). Ainsi, on a constaté que dans un certain cas le klydonographe a indiqué des surtensions de 5 à 7 fois la tension normale, tandis que l'oscillographe cathodique indiquait comme amplitude de la surtension une valeur qui n'atteignait que 3 fois la tension normale. Le rôle des klydonographies semble donc devoir se borner à enregistrer la fréquence approximative des surtensions. Pour les mesures quantitatives, on ne doit l'utiliser qu'avec une

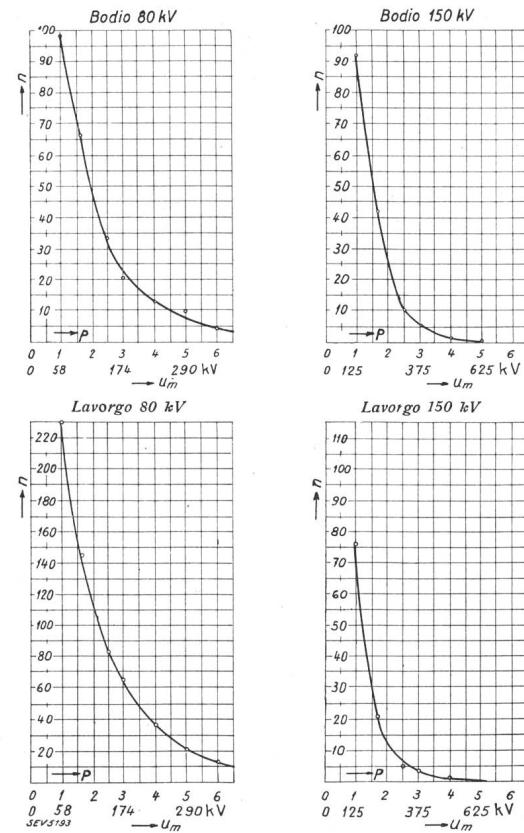


Fig. 14.

Diagrammes de la fréquence des surtensions de différentes valeurs d'origines diverses, établis d'après les mesures faites à l'aide de klydonographies, à Lavorgo et Bodio, en 1934.

Abscisse u_m Valeur de la surtension contre la terre, valeur absolue en kV et en multiples de la tension étoilée en service normal (P).

Ordonnée n Nombre des surtensions dont la valeur atteint ou dépasse la valeur d'abscisse.

grande circonspection; en particulier, les surtensions très élevées indiquées par les klydonographies sont de fausses mesures, tout au moins en grande partie.

Les diagrammes montrent distinctement la grande fréquence de faibles et moyennes surtensions jusqu'à env. 70 kV d'amplitude. La plupart des

lignes aériennes modernes sont heureusement isolées de façon à pouvoir supporter de telles tensions par à-coup, comme l'ont montré les mesures de chocs aux isolateurs de lignes aériennes. On remarque

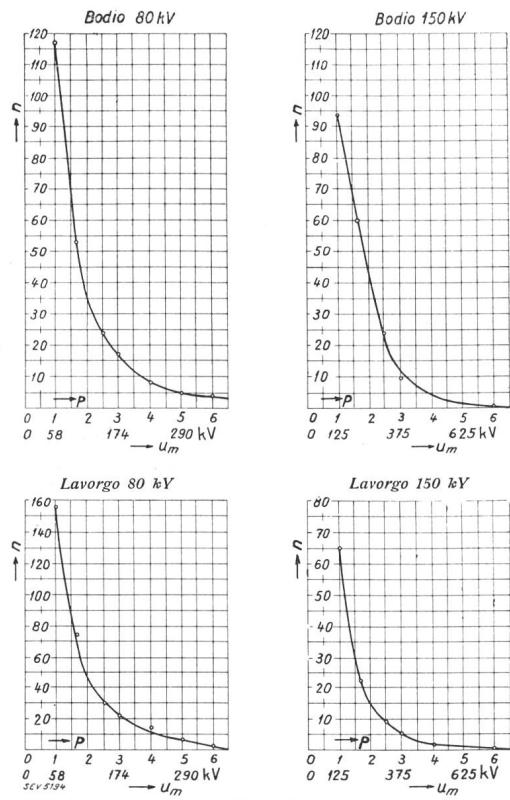


Fig. 15.
Comme figure 14, mais pour l'année 1935.

également que les diagrammes présentent un coude très brusque de 80 à 120 kV. Les tensions d'amplitude supérieure à env. 200 kV sont relativement peu nombreuses sur toutes les lignes observées, c'est-à-

leur limite de la tension la plus élevée s'obtient avec certitude en considérant si l'effet de la décharge atmosphérique sur la ligne provoque ou non le claquage des isolateurs des pylônes métalliques. Cette question est résolue avec certitude en examinant l'oscillogramme. En tenant également compte de cette considération, on reconnaît que les surtensions atmosphériques d'amplitude supérieure à env. 200 kV ne se présentent guère que quelques fois par année et par 100 km de longueur de ligne. Ces chiffres se rapprochent sensiblement de ceux des décharges directes dans la ligne. Il en résulte également que les ondes de surtension ne dépassent pas une amplitude d'env. 150 à 200 kV par suite de l'effet des décharges capacitatives sur les lignes. Ceci s'entend d'une façon presque générale pour les lignes normales, car l'effet de protection d'un câble de terre dans les lignes à tension de service élevée est compensé en partie par la grande élévation de ces lignes au-dessus du sol, la valeur des surtensions provoquées par les décharges capacitatives, c'est-à-dire les coups de foudre indirects, étant comme on le sait proportionnelle à la hauteur de la ligne au-dessus du sol. De nos jours une détermination du degré de sécurité des lignes et installations électriques devrait essentiellement tenir compte de ces phénomènes. Les surtensions supérieures à env. 200 kV ne sont plus provoquées que par des coups de foudre directs dans la ligne ou les pylônes. Ce dernier cas offre un intérêt tout particulier et sera discuté plus loin.

IV. Résultats des mesures du courant engendré par la foudre et des mesures de la raideur.

a) Les résultats des *mesures du courant engendré par la foudre à l'aide de barrettes d'acier* sont indiqués au tableau II.

Tableau II.

Courant dans le pylône, en kA . . .	5...10	10,1...20	20,1...30	30,1...40	40,1...50	> 50	—	—
Nombre de pylônes	6	5	1*)	1	0	0	—	—
Courants dans les câbles de terre, en kA	1...5	5,1...10	10,1...20	> 20	—	—	—	—
Nombre de mesures	35*)	10	0	0	—	—	—	—
Courants engendrés par la foudre, en kA	< 10	10,1...20	20,1...30	30,1...40	40,1...50	50,1...60	60,1...70	> 70
Nombre d'éclairs	?	3	2*)	1	0	0	1	0

dire qu'elles ne se présentent plus que quelques rares fois par période d'orages à un endroit de mesure fixe des lignes à très haute tension.

A cette fréquence de décharges, l'amortissement des ondes depuis leur origine au-dessous du nuage à foudre jusqu'à l'endroit de mesure joue naturellement un grand rôle. On ne peut pas étendre sans autre à toute la ligne les tensions mesurées à un certain point. Toutefois, cette extension semble être possible avec quelque circonspection, quand il s'agit d'ondes de tension d'une durée relativement longue et dont la valeur est inférieure à la tension d'effluve de la ligne, car l'amortissement des ondes parcourant la ligne est alors le plus faible. La va-

Toutes les décharges atmosphériques indiquées se sont produites en été 1935 dans la ligne du Gotthard, à l'exception d'un seul cas. Ce cas est désigné dans les colonnes du tableau par un *).

Les résultats coïncident approximativement avec ceux qui ont déjà été obtenus avec la même méthode de mesure en Allemagne et aux Etats-Unis¹¹⁾. Il y a lieu de mentionner tout spécialement que les maxima ne sont pas toujours identiques dans les deux côtés étroits des pylônes selon la figure 12, ce qui provient probablement de la forte section des pylônes, car à la hauteur où les barrettes d'acier

¹¹⁾ H. Grünwald, CIGRE 1935, Rapport 326.
W. Lewis, CIGRE 1935, Rapport 315.

sont placées cette section atteint $8,5 \times 2,5 \text{ m}^2$ pour les pylônes d'arrêt et $8,5 \times 1,7 \text{ m}^2$ pour les pylônes d'alignement, selon la figure 12. On a mesuré par exemple:

Tableau III.

Dans le côté 1 — 2 (côté droit) = 4600	12 500	12 500	6 500	A
Dans le côté 3 — 4 (côté gauche) = 5800	3000	22 500	2 500	A

On n'a pas constaté de relation entre la position de la plus grande partie du courant et la position des phases atteintes par la foudre.

Les 7 courants supérieurs à 10 kA dans les pylônes proviennent:

dans 6 cas de la décharge d'un nuage chargé négativement par rapport au sol,

en aucun cas de la décharge d'un nuage chargé positivement,

dans un cas, la détermination de la polarité était douteuse.

Par contre, on a mesuré des courants inférieurs à 10 kA engendrés dans les pylônes par 2 décharges de nuages chargés positivement.

b) Les résultats des mesures de la raideur du courant engendré dans les pylônes par la foudre sont indiqués au tableau IV. L'étendue de mesure était réglée de façon à permettre l'enregistrement de raideurs de courant maxima d'env. 7 à 60 kA/ μ s.

Tableau IV.

Raideur de courant max. dans le pylône, en kA/ μ s	7 ... 10	10,1 ... 20	20,1 ... 30	30,1 ... 40	< 40
Nombre de 1934	(4+1)	(3+2)	0	0	0
Pylônes 1935	(7+2)	(3+2)	(3+0)	(3+0)	0

Dans le tableau IV, le premier chiffre indique le nombre des cas où la raideur de courant maxima dans le pylône était négative [$(di/dt)_{max} < 0$]. Le second chiffre désigne le nombre des cas où la raideur de courant maximum dans le pylône était positive [$(di/dt)_{max} > 0$]. Les grandes raideurs du courant engendré par la foudre se constatent pour des courants négatifs.

Dans 6 cas (pylônes 18, 116, 117, 119, 120, 126), les appareils de mesure de la raideur ont présenté des figures de Lichtenberg multiples, provenant soit d'un coup de foudre qui n'était pas un pur choc, soit de plus d'une décharge atmosphérique pendant l'exposition de la même pellicule photographique. Dans de tels cas, on doit admettre que la mesure magnétique du courant par les barrettes d'acier indique en partie des valeurs maxima trop faibles pour le courant dans le pylône, car une succession d'à-coups de courant de polarités inverses ne peut qu'affaiblir le magnétisme rémanent établi par l'à-coup maximum.

Les appareils de mesure de la raideur permettent de localiser d'une façon très précise l'endroit atteint par la foudre, parce que généralement seuls

les appareils du pylône affecté ou ceux des deux pylônes voisins d'une portée atteinte enregistrent une grande raideur. La figure 16 montre quelques exemples de figures de Lichtenberg relevées dans ces appareils. Enfin, la figure 17 indique les diagrammes de fréquence des raideurs positives et négatives des courants engendrés par la foudre en 1934 et 1935.

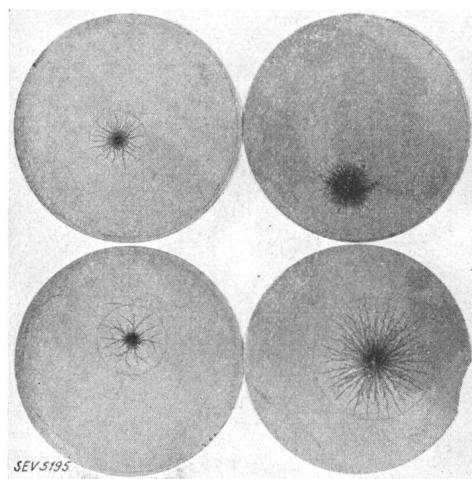


Fig. 16.

a b

Exemples de figures de Lichtenberg relevées dans les appareils de mesure de la raideur.

Figures supérieures: Tension induite correspondant à un accroissement positif du courant dû à la foudre.

Figures inférieures: Tension induite correspondant à un accroissement négatif du courant dû à la foudre.

a Perturbation a), chapitre V, pylône 17.

b Perturbation b), chapitre V, pylône 126.

Cette méthode a montré en outre que des tensions induites sont parfois également enregistrées, sans que les barrettes d'acier aient laissé reconnaître un fort courant dû à la foudre. Des décharges statiques des appareils de mesure de la raideur n'entrant pas en ligne de compte à cause de leur construction, on doit admettre que des décharges à

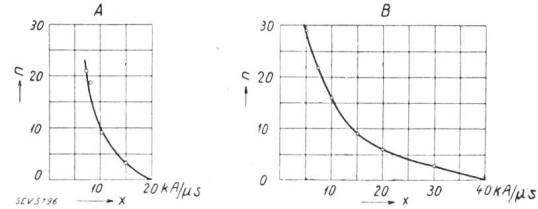


Fig. 17.

Diagrammes de la fréquence des raideurs de différentes valeurs des courants engendrés par la foudre dans les pylônes.

A Raideurs positives des courants engendrés dans les pylônes.

B Raideurs négatives des courants engendrés dans les pylônes.

Abscisse x Raideur mesurée du courant dans le pylône (valeur maximum).

Ordonnée y Nombre de mesures où la raideur atteint ou dépasse la valeur d'abscisse.

faible intensité engendrent dans les pylônes des courants de quelques 1000 A seulement, voire même inférieurs à 1000 A, qui ne sont plus enregistrés avec certitude par les barrettes d'acier.

Une indication sur la raideur moyenne des courants dus à la foudre est fournie en outre par les cas où des claquages de poteaux en bois se produi-

sent par suite de décharges atmosphériques dans des lignes mixtes. La distance entre le poteau en bois atteint et le pylône en fer le plus proche indique le temps maximum qui peut s'écouler jusqu'à ce que l'accroissement du courant engendré par la foudre provoque le claquage du poteau en bois. En effet, pour des intervalles plus longs, l'équilibre ne s'établirait plus par le poteau en bois vers la terre, mais bien par la ligne et le pylône suivant en fer vers la terre, car les pylônes en fer constit-

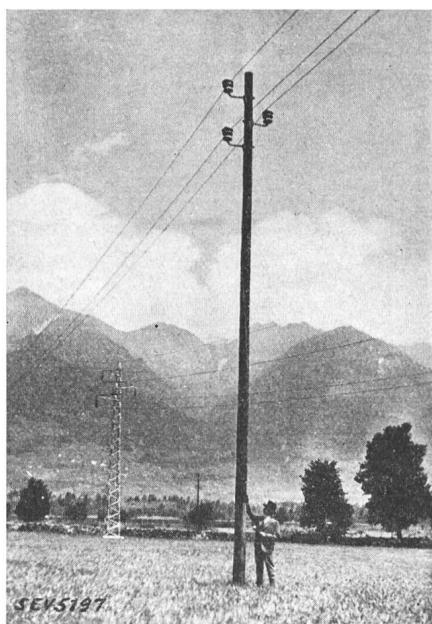


Fig. 18.
Vue de l'éclatement du poteau 27, distant de 400 m environ d'un pylône en fer mis à la terre de la même ligne.

tuent pour les tensions de choc des points beaucoup plus faibles que les poteaux en bois. A titre de comparaison avec ces mesures de la raideur, il y a lieu de mentionner une décharge atmosphérique qui s'est produite au printemps 1935 dans une ligne sur poteaux en bois pour tension de service de 50 kV près de Magadino. Cette décharge a provoqué des éclats (fig. 18) sur 10 poteaux (n° 28 à 37). Le dernier de ces poteaux (le n° 28) est distant de 355 m d'un pylône en fer (n° 21) de la même ligne. Ce pylône ne portait aucune trace de claquage. A une distance de 1978 m du pylône 21, la ligne était mise normalement à la terre, car elle était à ce moment-là hors service. Si l'on admet une tension de claquage de 5 millions de volts pour les poteaux en bois et une résistance d'onde de la ligne de 200Ω par sens de courant, donc une résistance d'onde résultante de 100Ω , il s'ensuit que le courant engendré par la foudre devait être d'au moins 50 kA. Une durée d'au moins $2,4 \mu s$ étant nécessaire pour obtenir l'équilibre par le pylône en fer, la raideur du courant engendré par la foudre a dû atteindre au moins $50/2,4 = 21 \text{ kA}/\mu s$. En considérant cette valeur moyenne d'accroissement de plus de $2,4 \mu s$, sa valeur maximum a probablement atteint $40 \text{ kA}/\mu s$. Cette valeur correspond en effet aux plus grandes raideurs mesurées.

A ce sujet, il est intéressant de signaler que, lors de cette décharge atmosphérique dans la ligne à 50 kV, la ligne sud à 80 kV passant parallèlement à 17 m de distance n'a subi aucune perturbation.

On continue à proposer souvent d'isoler un peu plus fortement certains pylônes des lignes à grandes portées, afin de reporter les claquages aux pylônes voisins. Les chiffres ci-dessus montrent nettement qu'une disposition de ce genre ne peut pas garantir de bons résultats. Même si le rapport des isolations atteignait 5000/200 kV pour une portée de 700 m, le pylône fortement isolé subirait un claquage s'il était atteint directement par la foudre.

V. Description de quelques perturbations typiques dues aux orages.

a) Perturbation dans la ligne du Gothard pendant l'orage du 10 juillet 1935, à 0³⁵.

Coup de foudre sur le pylône 17 au-dessus de Lavorgo, avec fonctionnement de l'éclateur de protection à l'extrémité de la ligne à Bodio.

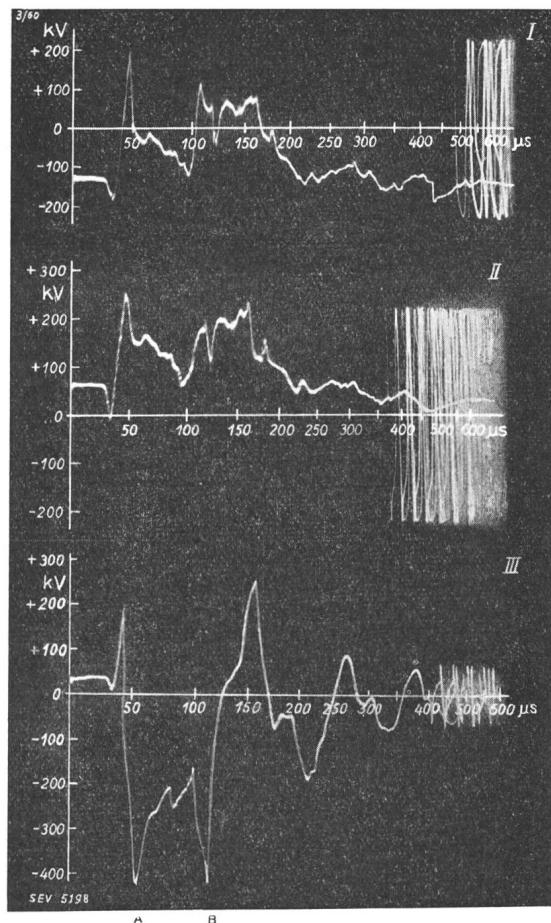


Fig. 19.
Oscillogramme de la perturbation a).
Les phases du réseau triphasé sont désignées par I, II, III.

Sur le pylône 17 et à l'extrémité de la ligne à Bodio, l'armature pare-arcs de la phase III présentait des traces de brûlure; en outre, le claquage à Bodio a été observé directement par le personnel de la sous-station. Le service à 150 kV a subi une

mise à terre accidentelle passagère, qui n'a pas donné lieu à des complications.

Les surtensions mesurées à Lavorgo entre les 3 phases de la ligne et la terre sont indiquées par les oscillogrammes de la figure 19. La phase III présente à Lavorgo une onde de surtension de 450 kV d'amplitude et d'une durée de demi-amplitude d'env. 50 μ s. Au pylône 17, le claquage de la chaîne d'isolateurs à 6 éléments «Motor» a exigé une ten-

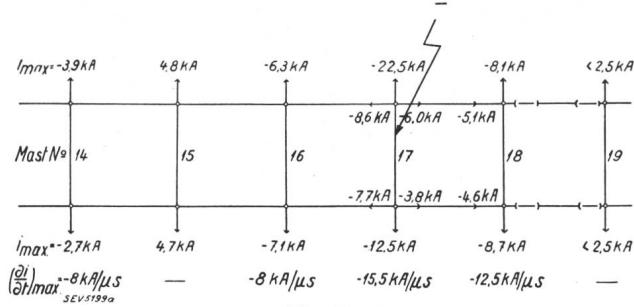


Fig. 20.

Répartition du courant dû à la foudre dans les cas de la perturbation a).

Courants indiqués en kiloampères (kA). Flèches transversales: Courants s'écoulant à la terre par les deux montants des pylônes. Flèches longitudinales: Courants s'écoulant par les deux câbles de terre.

sion de choc d'environ 1,1 million de volts (distance d'amorçage env. 1,75 m).

Après le premier passage de l'onde de surtension (amplitude en A), l'onde réfléchie revenant de Bodio se superpose en B, de sorte qu'il se produit une seconde pointe atteignant à nouveau 450 kV env. En B, cette pointe est supprimée brusquement par suite du fonctionnement de l'éclateur de protection installé à Bodio, de sorte que de cet endroit l'onde réfléchie se trouve au dos de l'onde incidente qui s'amortit. La suite du diagramme prouve qu'un claquage a eu lieu dans la ligne. En outre, en considérant la fréquence, resp. la période des oscillations subséquentes, on peut déterminer la distance Bodio-pylône 17. En admettant une vitesse d'onde sur la ligne égale à la vitesse de propagation de la lumière (300 000 km/s, resp. 300 m/ μ s), on obtient une distance de 16 km. La distance réelle étant de 13,67 km, la vitesse moyenne de l'onde de mise à terre était donc de 255 m/ μ s. La queue de ligne Lavorgo-Bodio a certainement empêché dans ce cas un claquage au poste de Lavorgo. La mesure de l'intensité du courant engendré par la foudre à l'aide des barrettes d'acier a permis de reconstituer la répartition du courant (fig. 20). Le tronçon entre les pylônes 15 et 18 est équipé d'un câble de sol (contrepoids). La résistance de terre du pylône 17 atteignait 2 Ω lors de la construction de la ligne, valeur mesurée sans les câbles de terre, mais avec un ruban de terre de 176 m.

La disposition des câbles de terre est identique à celle de la figure 1. Toutefois, lors de la décharge atmosphérique, les deux câbles de terre étaient sectionnés au pylône 19, entre ce dernier et le pylône 18 et 19 (voir fig. 20). Aucun courant ne pouvait donc s'écouler par les câbles de terre aux pylônes suivants.

Les dispositifs de mesure de la raideur indiquent une décharge atmosphérique sur le pylône 17 ou sur l'une des phases à proximité immédiate de ce pylône. La raideur maximum du courant dans le pylône était de $-15.5 \text{ kA}/\mu\text{s}$, ce qui correspond à un accroissement rapide de la décharge d'un nuage négatif au-dessus du pylône. Le courant dans le pylône de 35 kA a donc exigé pour cet accroissement au moins $35/15.5 \sim 2.25 \mu\text{s}$, mais probablement presque le double, car la raideur mesurée est sa valeur maximum.

En calculant le courant engendré par la foudre comme somme des courants s'écoulant par le pylône 17 et les deux câbles de terre, on obtient une amplitude de 61,1 kA. Cette valeur est la valeur maximum des mesures effectuées en été 1935. Par contre, la raideur maximum du courant était plus grande dans le cas de trois autres décharges atmosphériques avec un courant plus faible engendré par la foudre. Il semble donc que l'amplitude des décharges à forts courants ne se développe pas aussi rapidement que pour les décharges à courants moyens de 10 à 40 kA. Il se peut que, contrairement à ce qui se passe pour les courants moyens, les courants extrêmement élevés résultent de fluctuations grimpantes dans le canal amorcé par la décharge entre la terre et le nuage¹²⁾.

b) Perturbation dans la ligne du Gothard pendant l'orage du 12 juin 1935, à 0⁴⁴.

Une mise à terre accidentelle s'est produite dans la phase II au pylône 116 pendant quelques mi-

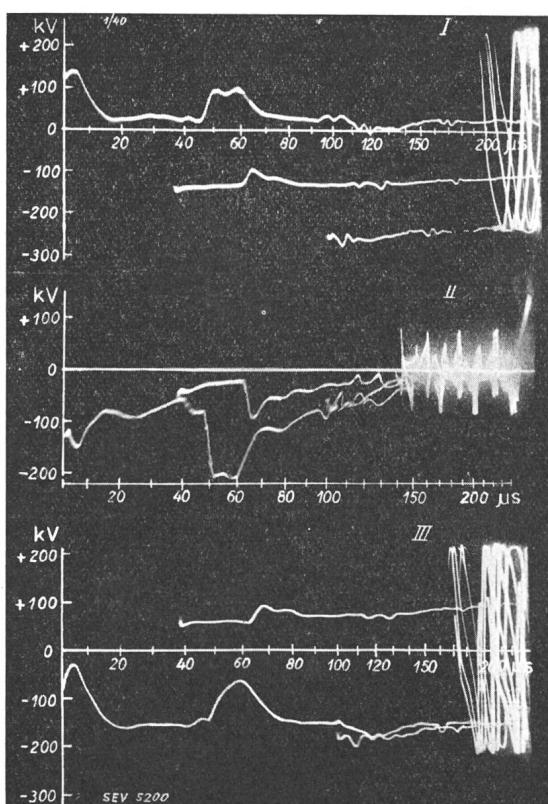


Fig. 21.
Oscillogramme de la perturbation b).
Les phases du réseau triphasé sont désignées par I, II, III.

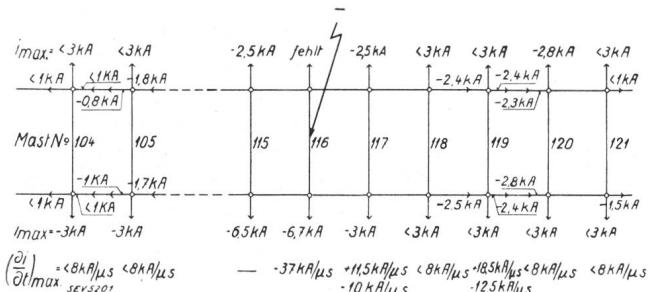
¹²⁾ K. Berger, CIGRE 1935, Rapport 350.

nutes. Grâce à la bonne disposition des armatures pare-arcs, cette perturbation n'a pas donné lieu à de fortes brûlures et est restée sans effet sur le service à 150 kV.

L'oscillogramme des surtensions produites par cette décharge atmosphérique a été relevé à Lavorgo (fig. 21). Même dans la phase II la plus fortement atteinte, l'amplitude n'atteint à Lavorgo qu'environ 150 kV, resp. 210 kV (tension totale de l'onde incidente et de l'onde réfléchie à Bodio), du fait de l'amortissement exercé par le passage du tronçon de 37,40 km.

L'oscillogramme de la phase II permet d'estimer encore à environ 40 km la distance qui sépare Lavorgo du point affecté par la décharge, si l'on admet que la vitesse de l'onde atteignait celle de la lumière (300 m/μs). Comme on le voit, la vitesse réelle de l'onde était également de quelques pourcents plus faible.

La figure 22 montre la répartition du courant dans les pylônes et les câbles de terre. Malheureusement, les câbles de terre n'étaient pas munis de



Comme figure 20, mais pour la perturbation b).

barrettes d'acier au pylône 116, de sorte que la représentation n'est pas aussi complète qu'on l'aurait désiré.

Les dispositifs de mesure de la raideur ont indiqué au pylône 116 une vitesse d'accroissement maximum de 37 kA/μs; dans ce cas également, il s'agissait de l'accroissement d'un courant engendré par la décharge d'un nuage chargé négativement. C'est la plus forte raideur mesurée en été 1935 pour le courant engendré par la foudre dans un pylône. Le courant d'environ 14 kA dans le pylône 116 s'est donc établi pendant une durée qui a atteint au moins $14/37 \sim 0,4 \mu s$, probablement environ 1 μs .

La résistance de terre du pylône atteignait 14 Ω lors de la construction de la ligne, valeur mesurée sans les câbles de terre, mais avec un ruban de terre de 51 m.

Comme dans l'exemple a), un accroissement subéquent de cette résistance à une valeur double (séchage du sol) ne permet pas d'expliquer un claquage en retour de la chaîne d'isolateurs sous 14 kA.

c) Perturbation dans la ligne du Gothard pendant l'orage du 2 juillet 1935, à 17⁰⁹.

Cette perturbation a provoqué immédiatement un court-circuit triphasé sur la ligne.

Les barrettes d'acier et les dispositifs de mesure de la raideur ont indiqué, pendant la période de

contrôle, deux décharges atmosphériques, l'une sur le pylône 126, et l'autre sur la portée entre les pylônes 119 et 120 (fig. 16).

Cette seconde décharge servira d'exemple de décharge sur les portées (fig. 23).

Dans ce cas, la décharge a affecté les deux câbles de terre de la portée et probablement les conduc-

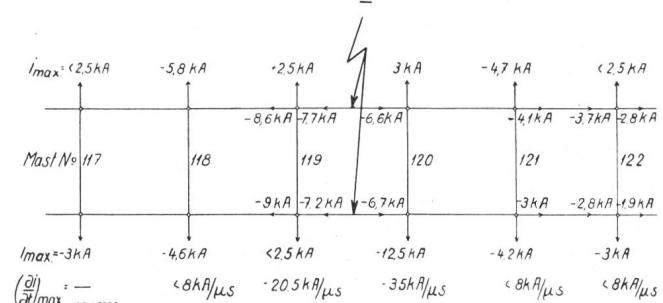


Fig. 23.
Comme figure 20, mais pour la perturbation c).

teurs, ce qui a provoqué un court-circuit triphasé.

La raideur de l'accroissement du courant dû à la foudre est très forte dans les deux pylônes adjacents 119 et 120 (20,5, resp. 35 kA/μs), ce qui explique le court-circuit dans la portée de 435 m.

Les résistances de terre sans câbles de terre atteignaient:

pour le pylône 119: 10 Ω (ruban de terre de 93 m),
» » » 120: 15 Ω (ruban de terre de 133 m).

Les deux pylônes sont fixés au roc recouvert d'une mince couche d'humus. Avec ces résistances, les valeurs mesurées des courants dans le pylône ne devaient pas provoquer de claquages en retour au pylône 120. Toutefois, par suite d'un court-circuit probable dans cette portée, le courant engendré par la foudre dépassait probablement la somme des 4 courants qui s'écoulaient par les câbles de terre (28,2 kA), car les conducteurs ont également participé à l'écoulement du courant. L'accès difficile de cette portée n'a pas permis un contrôle direct des câbles.

d) Surtension dans la ligne du Gothard mise normalement à la terre à Bodio et au Gothard, pendant l'orage du 3 août 1934, à 17¹³.

La figure 24 est un exemple de surtension relativement élevée induite par la foudre dans la ligne

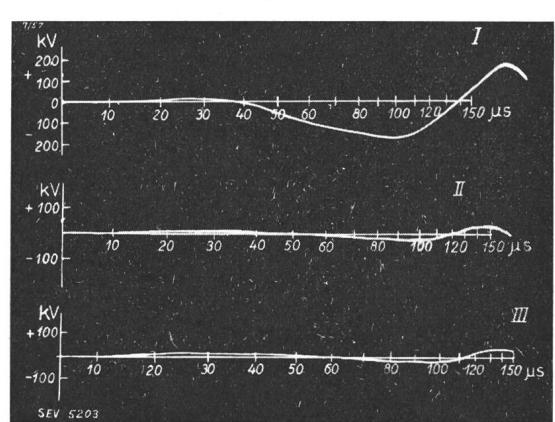


Fig. 24.
Oscillogramme de la perturbation d).

du Gothard mise normalement à la terre à 8,2 et à 38,9 km de l'endroit de mesure de Lavorgo, soit à Bodio et au pylône 120. Par suite d'un orage survenu entre ces deux points mis à la terre, une onde d'environ 130 kV s'est produite dans la phase I et apparaît une seconde fois sur l'oscillogramme avec changement de signe après avoir été réfléchie à la prise de terre de Bodio.

On remarquera tout spécialement la grande différence qui existe entre les surtensions dans les 3 phases. Il est probable que la décharge atmosphérique s'est faite le long d'une pente du côté est de la vallée, ou alors sur la grande portée (1494 m).

e) Perturbation dans la ligne sud à 80 kV pendant l'orage du 12 juin 1935, à 2²⁵.

Au cours d'un orage avec vent violent, des mises à terre accidentelles se sont produites à plusieurs reprises dans la phase I («vert») de la ligne sud à

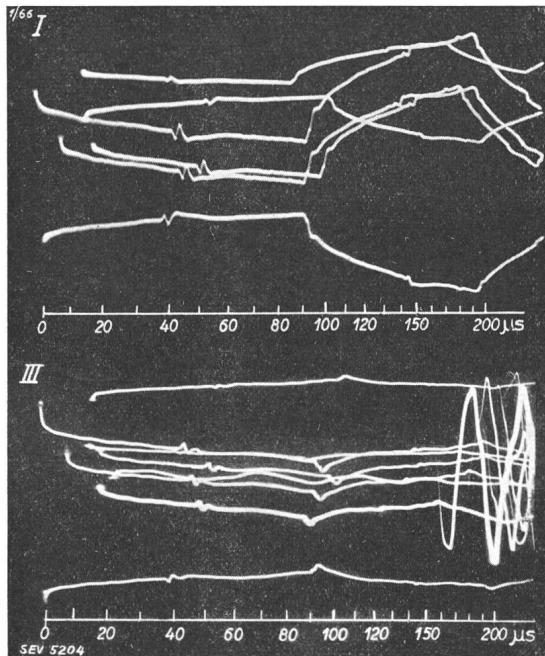


Fig. 25.
Oscillogramme de la perturbation e).

80 kV. L'oscillogramme de la figure 25 montre qu'il ne s'agit pas de surtensions dues à la foudre, mais de l'action du vent violent sur le câble de terre. Cet oscillogramme est reproduit ici, parce que la période d'oscillation d'onde permet de lire sans autre la distance entre l'endroit de la perturbation et l'extrémité de la ligne à Lavorgo. En admettant que la vitesse de l'onde soit égale à celle de la lumière, la distance est d'environ $0,5 \times 93 \times 0,3 \sim 14$ km. Il est probable qu'à cet endroit le câble de terre a touché le conducteur «vert», ce qui a causé chaque fois l'inscription d'un même oscillogramme. Aucune interruption de service ne s'est produite, car les mises à terre accidentelles se sont chaque fois supprimées d'elles-mêmes.

f) Perturbation dans la ligne sud à 80 kV pendant l'orage du 24 septembre 1935, à 6¹⁵.

Au cours d'un violent orage d'automne entre Bellinzona et Locarno, une décharge atmosphérique s'est produite sur la ligne à 50 kV sur poteaux en bois Bodio-Reazzino, provoquant l'éclatement de six poteaux (n° 650 à 655), en partie de haut en bas. On n'a toutefois pas pu constater la moindre trace de l'entrée de la foudre dans le sol. La ligne à 80 kV observée était parallèle à la ligne perturbée à 50 kV sur une distance d'environ 140 m. Les oscillogrammes des surtensions mesurées à Lavorgo à l'extrémité de la ligne à 80 kV sont indiqués sur la figure 26.

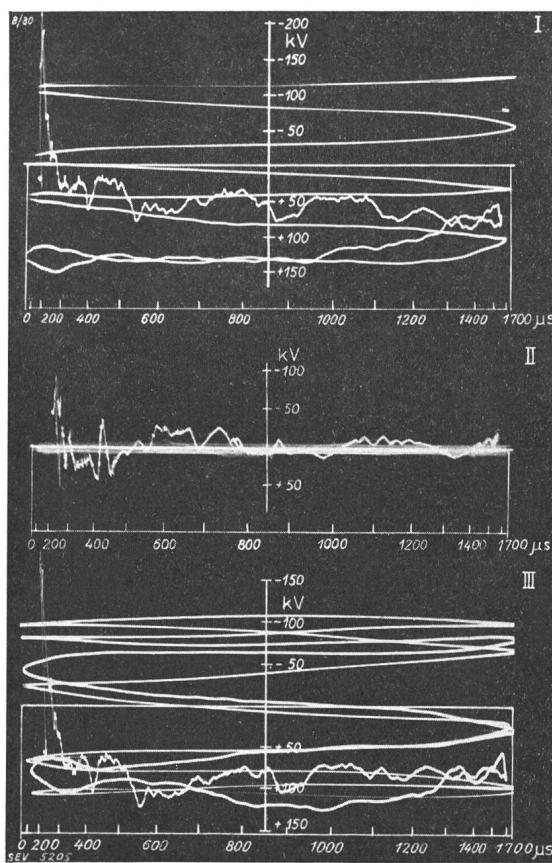


Fig. 26.
Oscillogramme de la perturbation f).

Il y a lieu de mentionner que l'échelle des oscillogrammes suivants est différente, car le déplacement du rayon cathodique, qui est ordinairement rapide à l'aller et lent au retour avait été remplacé par un déplacement continu sinusoidal à l'aller et au retour, avec tension auxiliaire à 295 pér./s. Pour obtenir l'indépendance nécessaire par rapport au réseau observé, cette tension auxiliaire était fournie par un convertisseur de fréquence spécial.

L'échelle des temps de 1700 μs par déplacement d'aller et retour paraît donc ramassée aux deux extrémités du trajet de l'axe des temps. Cette disposition permet d'inscrire pendant une plus longue durée sur un même oscillogramme. On a eu recours à ce système afin de pouvoir lire également sur l'oscillogramme les grandes distances où pourraient se produire des perturbations. Le rapport entre la fréquence auxiliaire et la fréquence du réseau étant très approximativement de 6, le trajet de l'axe des temps est décrit 6 fois à l'aller et au retour pendant une période de la tension à 50 pér./s.

Au bout d'environ $1/50$ s, l'oscillographe cathodique bloque à nouveau le rayon cathodique.

On observe sur la figure 26 des pointes de surtension de 180 et 200 kV et des demi-amplitudes d'environ 20 μ s dans les phases I et III («vert et bleu»). La phase II («rouge») présente des surtensions plus faibles, amorçant immédiatement une mise à terre accidentelle, qui se maintient pendant la période enregistrée de la fréquence du réseau. Cette mise à terre, qui s'est supprimée d'elle-même, n'a pas causé de perturbation dans le service. De la période de l'oscillation peu accentuée d'environ 300 μ s, on calcule que la perturbation a eu lieu à une distance d'environ 45 km, en admettant une vitesse d'onde de 300 m/ μ s. La distance exacte était de 42 km, correspondant à une vitesse d'onde d'environ 280 m/ μ s.

g) Perturbation dans la ligne de 80 kV pendant l'orage du 26 août 1935, à 18⁵⁰.

Au cours d'un orage sur le Tessin, on a relevé l'oscillogramme de la figure 27, qui montre la formation d'un court-circuit dans la phase III («bleu»), par suite d'une forte surtension de très faible durée (durée d'une demi-amplitude environ 5 μ s) due à la foudre. Les deux autres phases n'ont présenté que

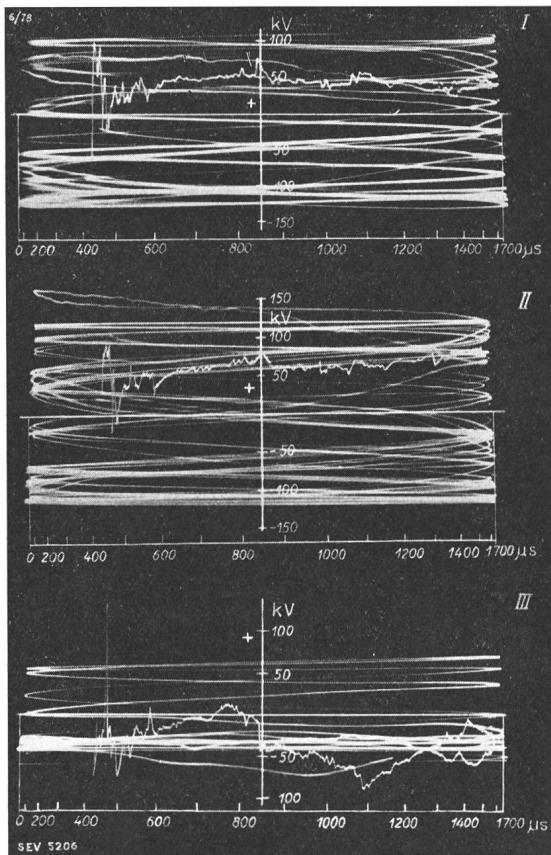


Fig. 27.
Oscillogramme de la perturbation *g*.

de très faibles surtensions. Il s'agissait probablement d'une décharge directe sur la phase III. De l'oscillation de décharge de la phase III, on déduit que sa distance de Lavorgo était de 48 km, resp. d'environ 44 km, selon que l'on table sur la vitesse de la lu-

mière ou sur la vitesse réelle des ondes de court-circuit observé dans d'autres cas. L'endroit atteint se trouvait donc à Reazzino-Monte Ceneri.

h) Perturbation dans la ligne à 80 kV pendant l'orage du 18 juillet 1935, à 18⁰⁴.

Au cours d'un orage dans la région de Ponte Tresa et de l'Italie du Nord, un court-circuit s'est

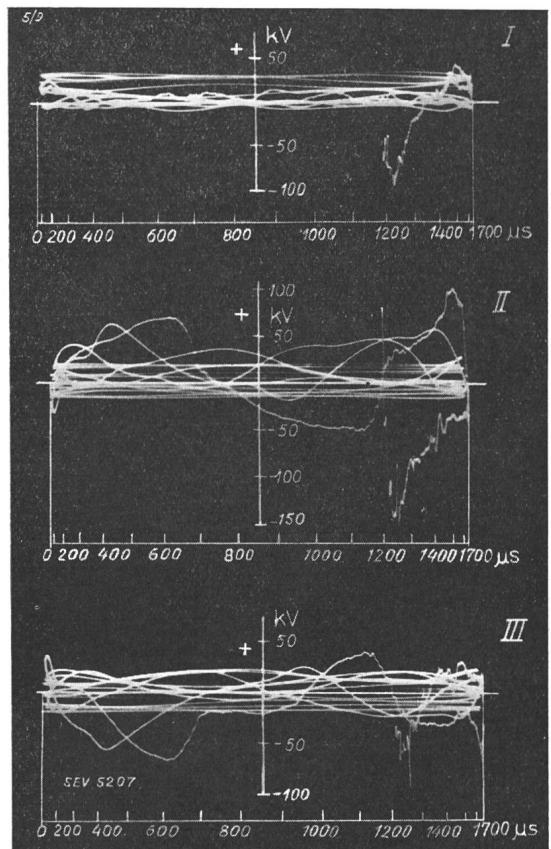


Fig. 28.
Oscillogramme de la perturbation *h*.

produit, probablement à peu de distance de la frontière Suisse-Italie. La surtension mesurée à Lavorgo est représentée sur la figure 28. Cette surtension n'est pas très élevée, à cause du grand éloignement de l'endroit atteint; la durée de sa demi-amplitude est d'environ 130 μ s. La largeur très réduite de la bande de l'oscillogramme indique que la tension des phases s'est fortement abaissée durant le court-circuit. L'oscillation des ondes, très nette dans la phase II, permet de calculer l'éloignement de l'endroit atteint, qui est d'environ 75 km.

i) Perturbation dans la ligne à 80 kV pendant l'orage du 4 août 1935, à 18¹⁹.

Au cours d'un violent orage dans la région de la sous-station de Veveri (Italie), un court-circuit a endommagé les isolateurs et provoqué, pendant une heure et demie, une interruption du service à 80 kV.

Les surtensions (réfléchies) mesurées à Lavorgo sont reproduites sur la figure 29.

Dans la phase III, la surtension atteint 5 fois la valeur de la tension de phase ou 300 kV contre la

terre; la durée d'une demi-amplitude des surtensions est de 130 μ s.

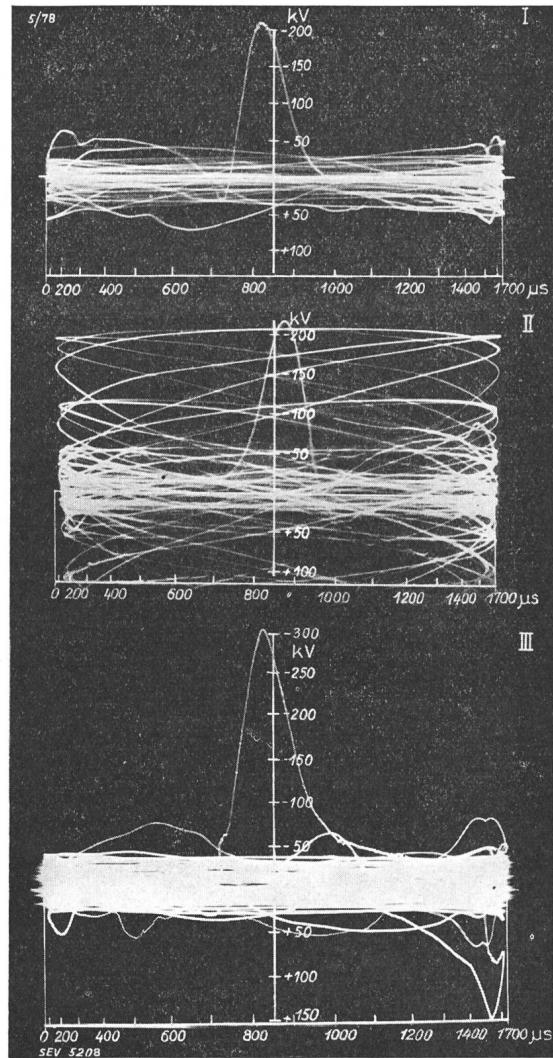


Fig. 29.
Oscillogramme de la perturbation i).

k) Des surtensions produites par la foudre, mais n'ayant pas provoqué de perturbations dans le service, sont indiquées sur les figures 30 à 33.

La première figure a été relevée le 4 août 1935, à 6²³, pendant le même orage que dans le cas i). Les trois autres figures ont été relevées le 24 septembre 1935 au cours d'un violent orage entre Bellinzona et Locarno, dont on a déjà parlé au cas f). On remarquera dans toutes ces figures le caractère de choc des surtensions dues à la foudre et l'allure oscillante des oscillations propres du réseau engendrées de la sorte.

l) Perturbation en amont d'un transformateur 150/50 kV pendant l'orage du 24 août 1935, à 3²⁷.

Un dernier exemple d'oscillogramme (fig. 34) montre de quel genre sont les ondes produites sur une ligne à 150 kV lors du déclenchement d'un court-circuit en amont d'un transformateur. Par suite d'un orage en amont du transformateur de Siebnen

(fig. 3), le disjoncteur à 150 kV de Rathausen a déclenché.

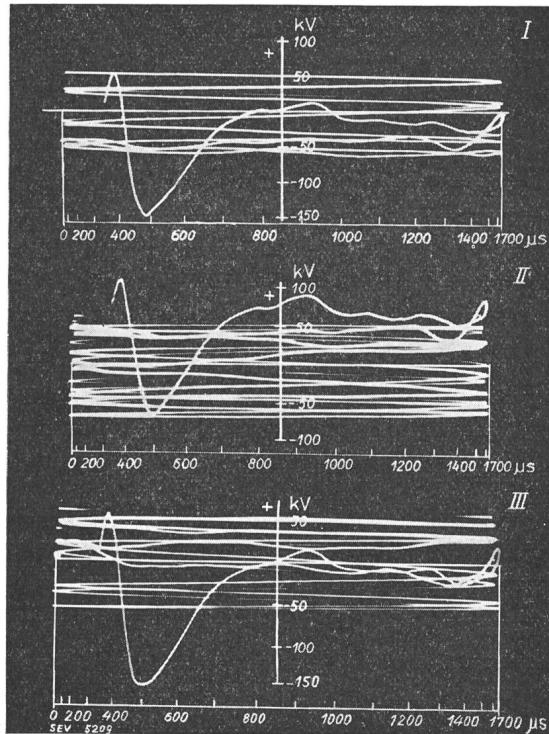


Fig. 30.
Premier exemple d'oscillogramme d'une surtension due à la foudre n'ayant pas causé de perturbation de service.

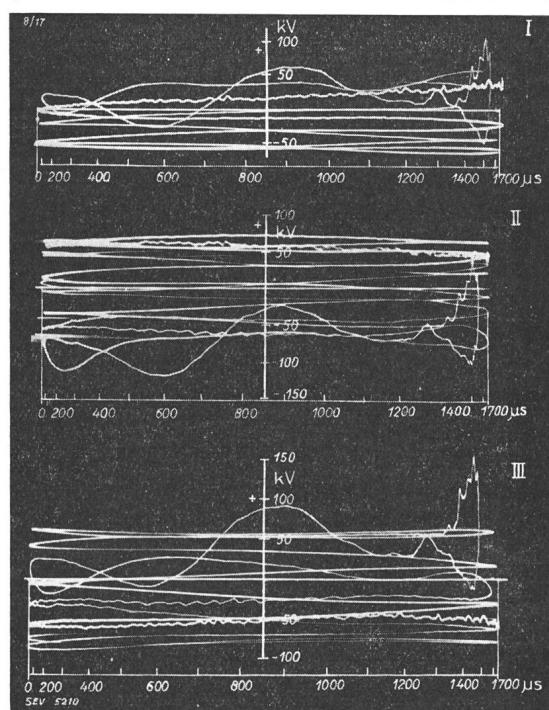


Fig. 31.
Deuxième exemple d'oscillogramme d'une surtension due à la foudre n'ayant pas causé de perturbation de service.

La figure montre qu'il se produit dans la ligne du Gothard des ondes, dont la durée est sensiblement plus longue que dans le cas de surtensions dues

à la foudre; par contre, leur valeur est insignifiante. Au cours du déclenchement, un grand nombre

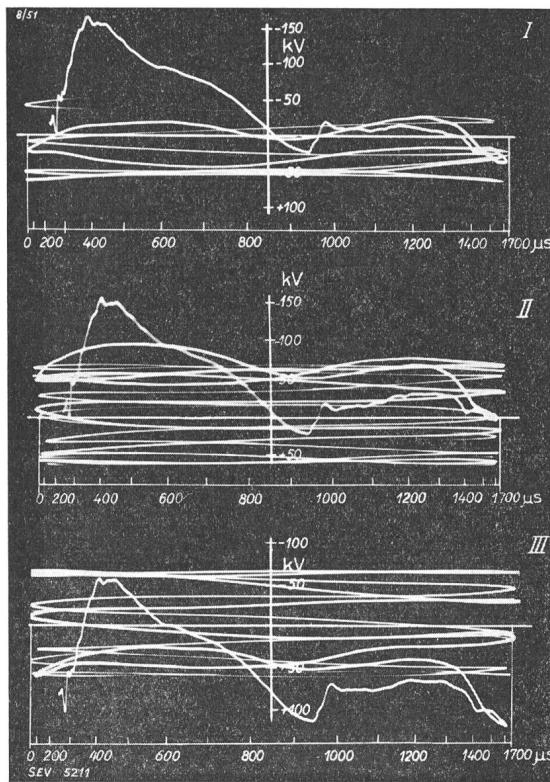


Fig. 32.

Troisième exemple d'oscillogramme d'une surtension due à la foudre n'ayant pas causé de perturbation de service.

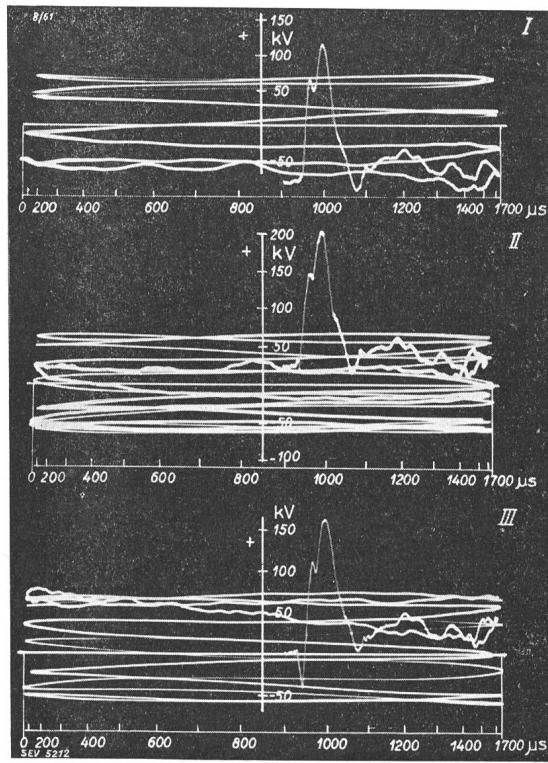


Fig. 33.

Quatrième exemple d'oscillogramme d'une surtension due à la foudre n'ayant pas causé de perturbation de service.

d'ondes, sont engendrées, mais leurs valeurs individuelles mesurées à Lavorgo ne dépassent toutefois jamais la tension en étoile.

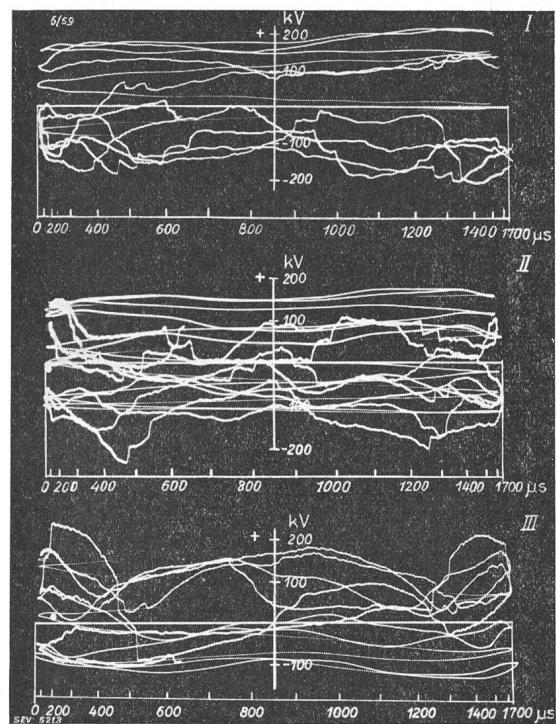


Fig. 34.

Oscillogramme des ondes produites par le déclenchement d'un court-circuit provoqué par une décharge atmosphérique en amont d'un transformateur à Siebenen.

VI. Conclusions et perspectives.

a) Prises de terre des pylônes.

Si l'on calcule la chute de tension produite dans la prise de terre du pylône par le courant dû à la foudre, en supposant que la résistance de la prise de terre lors du choc soit égale à la valeur mesurée par les méthodes habituelles avec ponts, les perturbations (cas *a*, *b*, *c*) constatées n'auraient dû en aucun cas provoquer de claquage en retour. Le cas *c* peut être laissé de côté, car le claquage s'est probablement produit dans la portée. Restent donc les perturbations provenant des pylônes 17 et 116. Dans ces deux cas, une décharge atmosphérique a dû s'être produite dans la phase moyenne (pylône d'arrêt 116) et dans l'une des phases extérieures (pylône d'alignement 17).

En plaçant également des barrettes d'acier sur les phases ou du côté mis à la terre des chaînes d'isolateurs, on pourrait résoudre cette question. Toutefois, une décharge directe sur les phases paraît improbable dans les deux cas, si l'on considère le croquis des pylônes. Il semble donc que les résistances de la prise de terre agissant lors du choc soient plus grandes que les valeurs mesurées de la façon habituelle. Un écart entre les valeurs agissant en cas de choc et celles qui sont mesurées à basse fréquence peut s'expliquer par les deux raisons suivantes:

1° L'énorme raideur de l'accroissement mesuré du courant engendré par la foudre dans le pylône

et par suite dans la prise de terre, qui exige l'établissement de prises de terre des pylônes selon les points de vue de la haute fréquence¹³⁾.

2^o La position des pylônes sur le roc isolant. Bien que l'on puisse obtenir une liaison relativement bonne du pied du pylône avec les couches superficielles conductrices environnantes, il peut arriver que ces couches superficielles n'aient elles-mêmes aucun rapport avec les couches d'humus plus éloignées. Le roc devant être considéré comme un isolateur, on peut expliquer ainsi l'écart entre les résistances mesurées à l'aide de sondes auxiliaires à 20 ou 40 m de distance du pylône et celles qui agissent lors des décharges atmosphériques. Dans ces conditions, tout le terrain entourant le pied du pylône serait sous tension par rapport à la «terre», du fait que la résistance en série est assez éloignée du pylône. Une solution de la question des prises de terre des pylônes montés sur le roc serait donc très désirable pour les lignes de montagne. Elle n'est probablement possible qu'en soumettant à de forts courants de choc les prises de terre des pylônes examinés.

b) Câble de sol.

Le claquage (probablement un claquage en retour) au pylône 17 s'est produit malgré la présence d'un câble de sol entre les pylônes 15 à 18. Les expériences faites en Amérique avec les câbles de sol paraissant très favorables, il y a lieu d'examiner avant tout très attentivement s'il ne s'est pas produit une décharge sur les phases ou les câbles de terre et les pylônes, dans tous les cas de perturbations dans les tronçons munis de câbles de sol.

D'après les mesures de la raideur des courants dus à la foudre et les recherches sur la valeur de protection des câbles de sol, il semble que le câble de sol peut constituer dans de nombreux cas (p. ex. cas a) une amélioration efficace de la mise à terre. Dans les cas de grande raideur, par exemple 35 kA/μs, l'efficacité du câble de sol doit se faire sentir autrement que par la réduction de la résistance de la mise à terre, éventuellement par un effet d'écran¹⁴⁾.

c) Contrainte de choc des isolateurs de lignes aériennes.

Par multiplication avec la résistance efficace de la prise de terre, les mesures de la raideur des courants dus à la foudre donnent sans autre la raideur approximative de l'accroissement de la tension aux isolateurs de la ligne aérienne, lorsque la foudre atteint le pylône ou le câble de terre.

Pour une raideur de courant de 35 kA/μs et une résistance efficace de la prise de terre de 20 Ω, le potentiel du pylône augmente avec une vitesse (raideur) maximum de 700 kV/μs. La différence de tension qui se présente aux chaînes d'isolateurs étant de 10 à 30 % plus faible, du fait de l'effet de protection capacitif du ou des câbles de terre, la raideur maximum de la tension à laquelle sont soumis les isolateurs atteint environ 500 à 600 kV/μs pour une

résistance de la prise de terre de 20 Ω. Si l'on table sur des raideurs de courant deux fois plus fortes (cas plutôt rare), les raideurs maxima peuvent atteindre 1000 kV/μs pour des prises de terre de pylônes présentant une résistance efficace de 20 Ω. Cette valeur représente la tangente la plus raide au front de la courbe de tension de choc, car les appareils de mesure de la raideur enregistrent toujours ce maximum. La valeur de la raideur selon la définition du projet de la CEI pour les essais de choc atteint approximativement la moitié de cette valeur maximum. La contrainte en cas de coup de foudre direct sur un pylône peut donc être remplacée en première approximation par un essai de choc selon la CEI avec une raideur de 500 kV/μs environ. Comme les mesures de raideur l'ont montré distinctement, la grande raideur ne se présente que dans le pylône affecté du coup de foudre. Dans les pylônes voisins, les à-coups de courant sont déjà beaucoup plus plats. Pour obtenir une valeur plus précise, il faut non seulement disposer d'un plus grand nombre d'enregistrements de la raideur, mais en outre procéder à un calcul plus exact de l'effet électromagnétique de compensation exercé par le courant du pylône sur le câble conducteur. Outre la chute de tension ohmique exacte et l'effet capacitif d'écran exercé par les câbles de terre, il faut probablement tenir compte des tensions magnétiques induites. On ne dispose toutefois pas encore de calculs absolument corrects¹⁵⁾.

Dans le cas de coups de foudre sur les conducteurs câblés des lignes sur pylônes en fer, les raideurs de la tension aux isolateurs sont encore plus grandes, car la raideur de la tension se calcule dans ce cas d'après la raideur du courant engendré par la foudre et la résistance d'onde efficace de la ligne. Ces valeurs peuvent atteindre environ 5000 kV/μs. Ces raideurs considérables expliquent les effets d'explosion auxquels sont soumis parfois les isolateurs de lignes aériennes.

d) Protection des bâtiments contre la foudre.

La connaissance de la raideur du courant engendré par la foudre permet d'estimer les écarts entre les parties métalliques des dispositifs de protection des bâtiments contre la foudre, entre lesquels des arcs s'amorcent lors d'une décharge atmosphérique sur l'une des parties métalliques.

Supposons par exemple deux descentes situées à une distance de a mètres, et reliées métalliquement par le sol. Si l'on admet que la «résistance d'onde» d'un conducteur vertical au-dessus du sol est de 200 Ω, il se produit lors d'un coup de foudre une onde de tension présentant une raideur maximum de $40 \times 200 \text{ kV}/\mu\text{s}$, c'est-à-dire de 8 millions de volts sur une longueur de conducteur de 300 m, ou de 800 kV pour un paratonnerre situé à 30 m au-dessus du sol. Jusqu'au retour de l'onde de la mise à terre, cette tension atteint $2 \times 800 = 1,6$ million de volts à la

¹³⁾ F. Ollendorf, Erdströme, Springer, Berlin 1928.
¹⁴⁾ Voir p. ex. V. Aigner, ETZ 1933, p. 1233.

¹⁵⁾ Voir V. Aigner, ETZ 1935, p. 497. L'auteur indique un calcul des tensions électro-magnétiques induites en admettant des courants périodiques.

pointe du paratonnerre. Sans tenir compte du couplage électromagnétique entre les deux descentes verticales, un arc s'amorcerait entre elles si leur écartement *a* était inférieur à 2,5 m environ. En tenant compte du couplage des deux descentes, cette distance diminue approximativement des $\frac{2}{3}$, c'est-à-dire à une distance d'environ 1,7 m entre les pointes des paratonnerres.

La distance d'amorçage diminue presque linéairement avec la hauteur des pointes au-dessus du sol. Ainsi, à 10 m au-dessus du sol, un amorçage d'arcs est possible entre parties métallique, dès que leur écartement est inférieur à environ 60 cm. Ceci s'entend pour liaisons métalliques par le sol des pièces métalliques (mise à la terre commune). Par contre, lorsqu'il s'agit de conducteurs absolument séparés ou reliés à des terres différentes, cet écartement peut être naturellement beaucoup plus grand, car on doit tenir compte des chutes de tension du courant dû à la foudre entre les mises à terre, d'une façon analogue à ce qui se passe lors d'un claquage en retour des pylônes. On voit donc qu'une connexion de toutes les parties de parafoudres à une terre unique (p. ex. canalisation d'eau) peut éviter dans une large mesure le danger de claquages entre les parties aériennes de l'installation de protection.

e) Forme du choc occasionné par les décharges atmosphériques.

L'oscillogramme de la figure 19 relevé à 5 km du pylône 17 affecté par la foudre montre dans la phase III atteinte par la décharge une courbe de tension qui diffère de la forme normale de choc. En effet, au lieu d'un front raide partant brusquement de la valeur zéro de la surtension, on observe tout d'abord un bond de tension de polarité positive de demi-hauteur environ, suivi d'un choc négatif. On s'explique difficilement la première pointe. Le choc négatif présente une forme qui ne se distingue que par un front un peu plus plat de la forme normalisée à 1/50 μ s du projet de la CEI, mais dont la durée correspond assez bien.

Il serait intéressant de pouvoir obtenir un plus grand nombre de relevés oscillographiques de décharges atmosphériques survenues à peu de distance sur la ligne, afin de pouvoir observer si ce front brisé se présente souvent, s'il est en relation avec le claquage en retour au pylône, ou s'il peut fournir de plus amples détails sur ce qui se passe lors d'un coup de foudre.

Il se pourrait également que les raideurs positives et négatives mesurées dans un même cas pour le courant engendré par la foudre dans un pylône ($+12,5 \text{ kA}/\mu\text{s}$, $-15,5 \text{ kA}/\mu\text{s}$) proviennent d'un détail affectant la décharge atmosphérique, et non pas de plusieurs décharges consécutives.

f) Transmission d'ondes sur les lignes.

Dans la ligne du Gothard, on a constaté nettement les deux phénomènes suivants: La vitesse des ondes de mise à terre est d'environ 10 % inférieure

à la vitesse de la lumière, et il se forme des trains d'ondes sur la ligne lors des décharges atmosphériques. Sur les oscillogrammes des cas *a*) et *b*) surtout, on remarque que l'onde négative de tension élevée engendrée par un coup de foudre dans une des phases est toujours accompagnée d'ondes positives de tension moins élevée dans les deux autres phases. Lors de la transmission le long d'une ligne d'une onde amorcée sur l'une des phases, il se forme toujours des trains d'ondes par suite de la répartition de la charge électrique de l'onde amorcée et des ondes influencées¹⁶⁾. L'un des trains d'ondes parcourt la ligne à la vitesse de la lumière sous la forme d'une onde symétrique (un conducteur chargé négativement, les deux autres chargés positivement par la demi-tension). Le second train d'ondes se transmet avec une vitesse légèrement réduite comme une onde entre ligne et terre et se comporte comme si les conducteurs étaient couplés en parallèle. L'examen théorique de ce second groupe n'a malheureusement pas encore été traité assez à fond pour permettre d'expliquer nettement ce phénomène.

g) Perspectives.

Les observations des surtensions d'origine atmosphérique ont pu être sensiblement étendues en 1934 et 1935. On a constaté que toutes les perturbations dans la ligne du Gothard à 150 kV étaient dues exclusivement à des coups de foudre directs. Toutes les surtensions qui ont conduit à des claquages dans les lignes à 150 kV et à 80 kV étaient de polarité négative. Leur durée varie sensiblement; la durée d'une demi-période est de 10 à 120 μ s.

Pour pouvoir décider de la valeur protectrice des mises à la terre des pylônes et des câbles de sol, il semble très utile d'examiner à l'avenir si un conducteur ou un câble de terre ou un pylône a été atteint par la foudre. Cette question doit pouvoir être résolue en équipant également les chaînes d'isolateurs, resp. les conducteurs, de barrettes d'acier selon la proposition de la Société allemande d'études des installations à très hautes tensions. Une extension des mesures de la raideur des courants engendrés par la foudre est en outre désirable, afin de pouvoir déterminer d'une façon plus précise la contrainte subie par les isolateurs des lignes aériennes et les mises à la terre des pylônes, et de pouvoir constater avec plus d'exactitude l'efficacité de l'effet de protection des câbles de sol. Du fait que l'on dispose actuellement dans ce but de dispositifs de mesure relativement peu coûteux et simples, ces mesures ne présentent en principe plus de difficultés.

Il s'agira d'examiner jusqu'à quel point les isolateurs pour lignes aériennes doivent être essayés conformément aux raideurs des ondes à front raide observées lors des coups de foudre, et de quelle façon se comportent les mises à la terre des pylônes des diverses lignes à haute tension, lors de chocs de

¹⁶⁾ L. V. Bewley, Traveling Waves on Transmission Lines, 1933.

courant artificiels présentant ces raideurs. La solution de cette seconde tâche exige avant tout la mise au point d'une installation de choc transportable à grande puissance.

Seule une mesure correcte a permis jusqu'ici d'obtenir des précisions sur les phénomènes de la foudre, et elle seule, en liaison avec une étude théorique, est capable de donner une explication complète des questions encore en suspens, qui concernent la détermination précise de l'endroit où s'est

produit la décharge atmosphérique et le cas des mises à la terre.

La Direction des Officine Elettriche Ticinesi et de la Centrale de Piottino, ainsi que le personnel des stations et les surveillants de la ligne du Gotthard ont contribué largement au succès de ces mesures effectuées pendant les orages. En particulier, les mesures du courant engendré par la foudre dans les pylônes n'auraient presque pas été possibles sans leur aide efficace.

Ueber einige Anwendungen des Oszillographen zur Untersuchung nichtelektrischer Vorgänge.

Von Hartmut Keller, Zürich.

621.317.39 : 621.317.75

Moderne Oszillographen und Verstärker gestatten die trägeheitsfreie Registrierung elektrischer Vorgänge innerhalb sehr weiter Grenzen. Es liegt nahe, diese Instrumente wegen ihrer guten Eigenschaften auch für die Untersuchung nichtelektrischer Vorgänge nutzbar zu machen. Hierüber berichtet der nachstehende Beitrag, wobei auf die Registrierung mechanischer Schwingungen, kleiner Bewegungen und Längenänderungen, Messung von Zug, Druck, Torsion und Dehnung, Erschütterung und Beschleunigung eingegangen wird.

Les oscilloscopes et amplificateurs modernes permettent d'enregistrer sans inertie les phénomènes électriques dans de très larges limites. On est poussé à utiliser les excellentes propriétés de ces instruments pour l'étude de phénomènes non électriques. L'article ci-après traite de ces nouvelles applications, en particulier de l'enregistrement d'oscillations mécaniques, de faibles mouvements et variations de longueur, ainsi que de la mesure de la traction, de la pression, de la torsion, de l'allongement, des vibrations et de l'accélération.

Es ist in der Messtechnik öfters üblich, nichtelektrische Größen in elektrische zu verwandeln, welche der exakten Messung häufig besser zugänglich sind als die nichtelektrischen Größen selbst. Das ist beispielsweise bei der Temperaturmessung mit Pyrometern, bei der Messung optischer Eigenschaften mit lichtelektrischen Zellen¹⁾, weiter bei Wassergeschwindigkeitsmessern und manchen Tachometern der Fall. Bei Untersuchung rasch verlaufender mechanischer Vorgänge hat sich der elektrische Oszillograph bewährt, zur Aufzeichnung mechanischer Schwingungen, kleiner Bewegungen und Längenänderungen, die unter anderem bei Messung des Schnittdruckes an Werkzeugmaschinen, Zug- und Druckmessungen an Brücken, Drücken in Verbrennungsmotoren, Drücken in Hochleistungsschaltern, Messung von Torsion und Dehnung, von Erschütterung und Beschleunigung interessieren. Durch die Vollkommenheit elektrischer Messverfahren und besonders durch die Möglichkeit, die aus den betreffenden mechanischen Vorgängen hervorgegangenen elektrischen Größen zu verstärken, gestatten diese Methoden die Lösung selbst schwieriger messtechnischer Aufgaben. Selbst sehr kleine zu beobachtende Vorgänge lassen sich innerhalb gewisser Grenzen praktisch trägeheitslos und verzerrungsfrei registrieren.

Zur Umsetzung der mechanischen in elektrische Vorgänge kann man verschiedene Wege gehen. Man kann die zu registrierende Bewegung zunächst zu entsprechenden Änderungen des Widerstandes, der Kapazität oder der Selbstinduktion eines elektrischen Kreises verwenden. Aber auch der piezoelektrische Effekt kann für solche Zwecke herangezogen werden. Nach einer anderen Methode ver-

ändert die zu verfolgende Kraft die mechanische Spannung und damit die Eigenfrequenz einer mechanisch schwingenden Saite. Die Schwingungen der Saite werden in Wechselströme umgesetzt, deren Frequenzänderungen mittels des in einer Frequenzmessbrücke liegenden Oszillographen aufgezeichnet werden²⁾.

Die Umsetzung von Bewegungen in Veränderungen eines ohmschen Widerstandes wird beispielsweise für schwingungstechnische Laufuntersuchungen an Fahrzeugen, besonders der Eisenbahn, benutzt³⁾. Eine Messung der Schwingungsausschläge interessiert dabei, weil sie auf die Beanspruchung und auch auf die augenblickliche Höchstbeanspruchung einzelner Teile, besonders der Federn, schließen lässt. Sie wird weiterhin zur Beobachtung der Federdurchbiegung, der Bewegung der Drehgestelle gegenüber dem Wagenkasten und der Wiegebewegungen gegenüber den Drehgestellen ausgeführt. Die Beschleunigungsmessung interessiert, weil man aus der Beschleunigung bei bekannter Masse die Kräfte und aus dem Beschleunigungs- und Schwingungsverlauf die Stossarbeit berechnen kann.

Zum Oszillographieren der Schwingungsvorgänge sind die Längsbewegungen, welche die schwingenden Teile gegenüber einem relativ feststehenden Teil ausführen, mit einem Aufnahmegerät in proportionale Ströme umzusetzen, die dann vom Oszillographen in Kurvenform aufgeschrieben werden, wobei dem Oszillogramm gleichzeitig in bekannter Weise eine Zeitmarkierung zugefügt wird. Das Aufnahmegerät ist, wie Fig. 1 schematisch zeigt, gemäß einer Wheatstoneschen Brücke geschaltet. Es

²⁾ H. Moser, Ein neuer Drehmomentmesser für oszillographische Registrierung, Bull. SEV 1934, S. 689.

³⁾ Lutteroth und Putze, Org. Fortschr. Eisenbahnw. 1932, S. 46.

¹⁾ H. Keller, Ueber die Möglichkeiten lichtelektrischer Mess- und Steuerungsmethoden, Bull. SEV 1935, S. 263.