Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 25 (1934)

Heft: 24

Artikel: Aperçus des progrès réalisés dans l'étude des orages et dans la protection des installations électriques contre les surtensions

Autor: Berger, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056588

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: 22.08.2025

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 de Centrales Suisses 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

XXVe Année | N° 24 | Vendredi, 23 Novembre 1934

Aperçu des progrès réalisés dans l'étude des orages et dans la protection des installations électriques contre les surtensions.

Conférence faite à l'Assemblée Générale de l'ASE du 7 juillet 1934, à Aarau,

par *K. Berger*, Ingénieur attaché à la commission de l'ASE pour les travaux à l'aide de l'oscillographe cathodique, Zurich.

621.316.93

L'auteur expose brièvement la formation des éclairs, telle qu'elle ressort des nombreuses recherches effectuées ces dernières années en Suisse et à l'étranger. Il explique ensuite avec plus de détails les effets électriques de la foudre et des orages sur le sol et commente la formation des perturbations d'origine atmosphérique auxquelles les installations électriques sont sujettes. Le progrès le plus précieux des dernières années réside en ce que l'on a pu mesurer à l'aide de l'oscillographe cathodique et d'autres moyens d'investigation l'intensité du courant des décharges, la hauteur des surtensions et leur durée. La protection des installations électriques contre les perturbations dues à la foudre repose aujourd'hui sur une base quantitative solide, à laquelle on n'apporte plus que des «retouches».

Der Vortragende berichtet in kurzen Zügen über das Bild des Blitzvorganges, wie es sich besonders aus den umfangreichen Forschungen des In- und Auslandes in den letzten Jahren ergeben hat. Etwas eingehender werden sodann die elektrischen Gewitter- und Blitzwirkungen am Erdboden und die Entstehungsweise der atmosphärischen Störungen in elektrischen Anlagen besprochen. Der wertvollste Fortschritt der letzten Jahre besteht darin, dass mit Kathodenstrahloszillographen und andern Messmitteln die zahlenmässige Erfassung von Blitzströmen und Blitzüberspannungen und ihrer Dauer gelungen ist. Der Schutz elektrischer Anlagen gegen Störungen durch Blitzeinwirkung steht heute auf einer quantitativ gesicherten Grundlage, an deren Feinheiten noch «gefeilt» wird.

I.

C'est du début du XVIIIe siècle que date la présomption que la foudre et l'étincelle électrique sont des phénomènes de même nature. La proposition classique de Franklin en 1750 et sa première réalisation à Paris en 1752 ont prouvé qu'en temps d'orage des étincelles peuvent être tirées de tiges de fer isolées. Depuis que Franklin a inauguré l'*expérience* pour l'étude des orages, la multiplicité des observations et des connaissances a conduit à un grand nombre de théories sur la formation de l'électricité en temps d'orage et de l'électricité atmosphérique en général. Il y a quelques années, deux théories entraient encore sérieusement en ligne de compte parmi une cinquantaine de théories différentes [1]). Aujourd'hui, sur la base des expériences de ces dernières années, je crois pouvoir dire qu'une seule théorie est susceptible d'expliquer d'une façon naturelle et logique la formation de l'électricité en temps d'orage et les conditions de l'électricité atmosphérique. Il s'agit de la théorie de l'orage établie en 1929 par C. T. R. Wilson, Cambridge.

Quand on a étudié le fouillis d'observations faites à propos de l'électricité atmosphérique, on ressent un véritable plaisir à rencontrer une théorie qui explique enfin les nombreuses observations qui semblaient parfois se contredire. La *théorie de Wilson* est trop belle et trop utile pour être complètement laissée de côté dans cet aperçu des plus récents progrès. Permettez-moi donc d'aborder pendant quelques minutes ce chapitre si intéressant au point de vue météorologique. Vous savez par le

[1]) Aux personnes qui s'intéressent aux théories modernes de l'orage, nous recommandons la lecture des articles suivants:

Sur les généralités:

K. Kähler: Der Ursprung der Gewitterelektrizität. Naturwiss. Vol. 16, 1928, p. 95; ou: Elektrizität der Gewitter, Sammlung Bornträger, Berlin 1924.

Sur les théories principales:

G. C. Simpson: Phil. Trans. A 209, 1909, p. 379; Proc. Royal Soc. A 111, 1926, p. 56; Proc. Royal Soc. A 114, 1927, p. 376.

C. T. R. Wilson: J. Frankl. Inst. Vol. 208, 1929, p. 1; Proc. Royal Soc. A 92, 1916, p. 555.

C. Dauzère: Revue Scientifique, 1930; Bull. Soc. Franc. Electr., Vol. XCIV, 1929, p. 575.

Sur l'électricité atmosphérique:

J. Bartels: Naturwiss., Vol. 16, 1928, p. 301.

F. E. Smith: I. Inst. of Electr. Engr., London, Vol. 73, 1933, p. 574.

Sur la formation de la foudre:

M. Töpler: Arch. Elektrotechn., Vol. 10, 1921, p. 157; Phys. Z., Vol. 22, 1921, p. 59; Bericht Sondertagung Blitzschutzfragen, Verband Sächs. EW, Dresden, 1932.

B. F. Schonland et T. E. Allibone: Nature 1931, p. 794.

E. C. Halliday: Phil. Mag. 7. Série 15, 1933, p. 409.

J. C. Jensen: J. Frankl. Inst., Vol. 216, 1933.

B. F. Schonland et R. Collens: Proc. R. Soc., Vol. 143, A 850, 1934.

«fading» si désagréable des réceptions radiophoniques que nous vivons sur cette terre dans un condensateur sphérique constitué par la surface du sol et par les couches conductrices à 100 et 300 km au-dessus de nous (couches dites de Kennelly/Heaviside et d'Appleton). La conductibilité de ces couches n'est pas du tout négligeable; elle atteint à peu près celle des acides pour accumulateurs et est environ 10 billions de fois supérieure à celle de l'air qui nous entoure. De ce condensateur sphérique nous ne connaissons guère que les 30 km in-

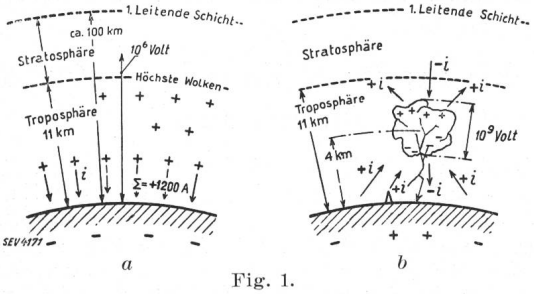


Fig. 1.
Croquis schématique de l'état électrique de l'atmosphère par temps calme (*a*) et par temps d'orage (*b*).

férieurs par les mesures faites à l'aide de ballons-sondes. On a ainsi constaté qu'entre la stratosphère et le sol règne constamment une tension électrique d'environ 1 million de volts, la terre étant toujours chargée négativement par rapport au «ciel». La figure 1 (a) illustre cette observation. Il s'ensuit que toute l'atmosphère est le siège d'un champ électrique, qui est le plus intense à la partie inférieure. L'existence d'un champ électrique atmosphérique est la première observation capitale. Par temps calme, c'est-à-dire sans orages, on observe en outre dans l'air au-dessus de la terre un courant continu constant qui amène sans cesse des charges positives au sol. Pour la Suisse, ce courant atteint à peine 0,1 ampère, mais pour toute la terre cet appoint se monte à la valeur considérable de + 1200 ampères. C'est la seconde observation capitale. Il s'agit maintenant de savoir pourqoi la charge négative de la terre n'est pas transformée peu à peu en charge positive, et d'où proviennent les charges positives de l'atmosphère.

Ces deux questions fondamentales pour l'électricité atmosphérique, Wilson les explique par l'action des orages. Le nuage d'orage représente une dynamo ou mieux encore une machine statique de très grandes dimensions, qui tire son énergie du poids des gouttes de pluie en mouvement et qui sépare ainsi les charges électriques qui existent toujours dans l'atmosphère de telle sorte que, dans le courant d'air vertical, des charges *positives se rassemblent vers le haut* et des charges *négatives vers le bas.* La figure 1 (a) montre l'état de l'atmosphère par temps calme et la figure 1 (b) le nuage d'orage selon Wilson, qui dans notre contrée se forme presque toujours à une altitude de 4 à 5 km. La manière dont cela se produit a été décrite par Wilson au point de vue qualitatif et quantitatif. On reconnaît que le nuage d'orage conduit au sol des charges négatives et non pas positives, ceci pour les deux raisons suivantes: D'une part à cause du rejet des charges négatives du bord inférieur du nuage vers le sol et de l'attraction des charges positives vers le haut et, d'autre part, à cause de la foudre qui passe de ces nuages au sol.

Du bord supérieur du nuage, des charges positives se dirigent également sans cesse vers la stratosphère et les couches supérieures bien conductrices. Ces charges se répartissent dans toute l'atmosphère terrestre, ce qui est la raison du courant positif permanent par temps calme. Selon une statistique anglaise [2]), au moins 100 éclairs et environ 1800 orages se produisent chaque seconde sur tout le globe. Leur transport d'électricité suffit amplement à expliquer la charge négative de la terre. Nous avons ainsi une représentation complète des conditions de l'électricité atmosphérique. La plus grande différence de potentiel dans le nuage d'orage atteint selon Wilson un million de kV; nous reviendrons dans la suite sur ce sujet. C'est peut-être de ces nuages que proviennent les rayons électroniques extrêmement durs appelés rayons cosmiques, dont l'origine était attribuée jusqu'ici au soleil.

Je regrette de devoir passer si rapidement sur cette théorie de la formation de l'électricité atmosphérique. Pour gagner du temps dans la descrip-

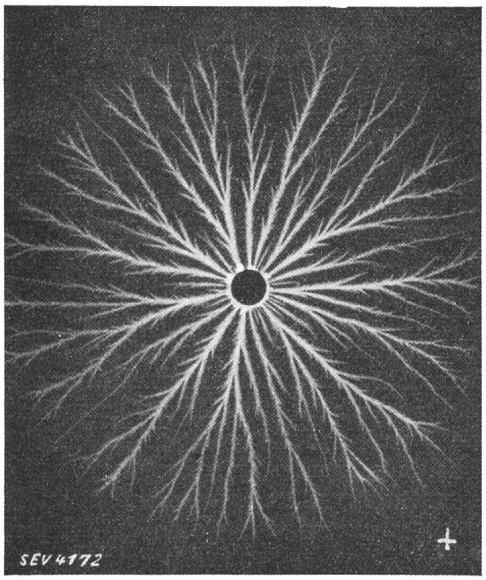


Fig. 2.
Figure positive de Lichtenberg sous faible tension. (Z. Physik 1933.)

tion de la foudre elle-même et des conditions à la surface du sol, nous supposerons que la séparation de l'électricité est déjà telle que les parties supérieures du nuage d'orage sont en majeure partie chargées positivement, tandis que les parties inférieures sont surtout chargées négativement, comme il ressort de la théorie de Wilson.

[2]) C. P. Brooks: Dép. Météor. du Ministère de l'Air anglais 1925; M. Töpler: Bericht Sondertagung, loc. cit., 1932.

II.

Comment peut-on se représenter maintenant la *formation de la foudre au milieu des innombrables gouttes d'eau et de brouillard du nuage?* Chaque goutte porte une charge électrique plus ou moins grande; chaque goutte est séparée des autres par une couche d'air isolante. Admettons que le courant d'air qui participe réellement à la séparation des charges positives et négatives poursuive sa fonction de telle sorte que finalement la tension entre quelques gouttes devienne si considérable qu'une petite étincelle d'équilibrage se produise entre elles. Si les deux gouttes considérées étaient seules, l'affaire se terminerait là. Mais lorsque ces deux gouttes sont entourées de nombreuses autres gouttes chargées, celles-ci peuvent maintenir le champ aux parties extérieures de ces deux gouttes. Si le champ est suffisamment intense, l'étincelle atteint également les gouttes voisines, qui se déchargent à leur tour ente elles. Toutes une zone peut ainsi se décharger peu à peu par une étincelle qui se propage dans les deux sens et se bifurque au besoin pour équilibrer toutes les charges à proximité, tant que le champ électrique nécessaire au maintien de l'étincelle est suffisant. La décharge se terminerait ainsi, *si la propagation de la petite étincelle ne provoquait pas dans le nuage un autre effet.* Pour expliquer ce dernier point, je dois vous rappeler une des lois principales de l'étincelle électrique: la loi dite de Töpler. Töpler avait constaté par des mesures extrêmement précises que la résistance électrique d'un parcours d'étincelle par cm de longueur diminue dans la même mesure que la quantité d'électricité passant par l'étincelle augmente. Pour l'étincelle d'amorçage de l'éclair, la résistance par cm diminuera dans la mesure où la longueur de l'étincelle augmente, c'est-à-dire que l'étincelle deviendra de mieux en mieux conductrice, ou pour parler en langage technique: La fine étincelle qui était au début mauvaise conductrice se transforme peu à peu en une sorte d'arc, dont la résistance électrique est très faible à cause de sa température élevée. Qu'en est-il pour la foudre? On peut se représenter d'une façon approximative que l'étincelle est remplacée par un fil métallique. Un tel fil dans le champ électrique du nuage d'orage provoque une variation de champ extrêmement considérable, en ce sens qu'aux deux extrémités du fil le champ est extraordinairement renforcé. Or, c'est à cette condition que l'étincelle peut se propager. Selon l'expression de Töpler, la tête de l'éclair «pousse constamment devant elle la chute de potentiel nécessaire à sa propagation», de sorte que l'éclair une fois en mouvement peut également se propager dans des zones qui étaient jus-

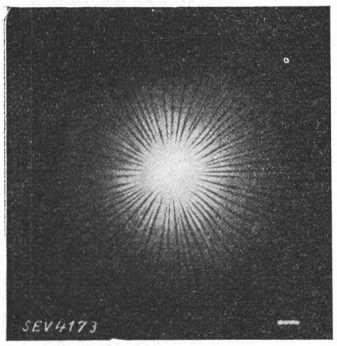


Fig. 3.
Figure négative de Lichtenberg sous faible tension. (Z. Physik 1933.)

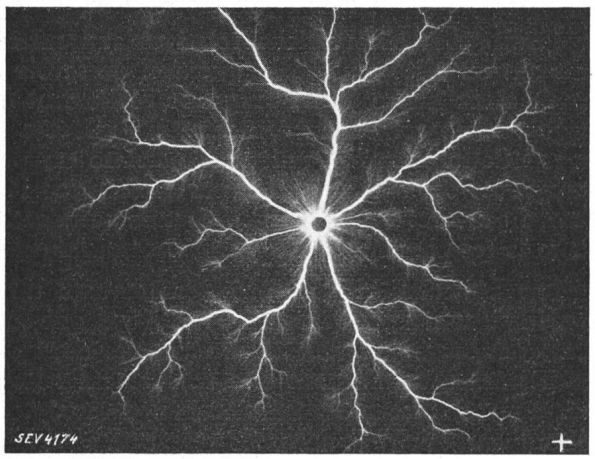


Fig. 4.
Figure positive d'étincelle glissante. (Z. Physik 1933.)

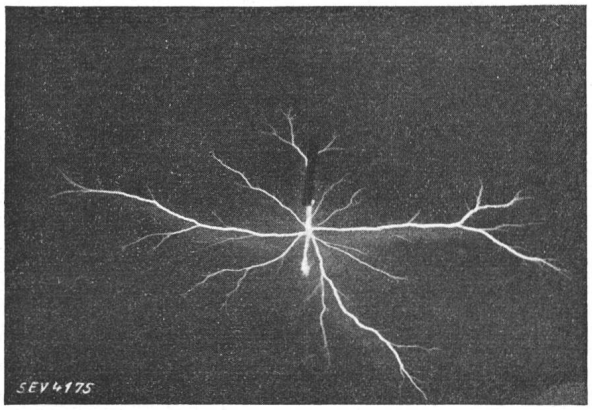


Fig. 5.
Figure positive d'étincelle glissante produite par une onde à front raide de 400 kV sur un plan d'eau, rayon env. 1,5 m.

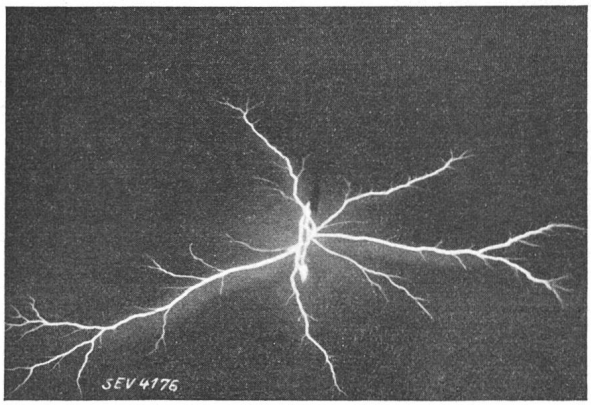


Fig. 6.
Figure négative d'étincelle glissante produite par une onde à front raide de 400 kV sur un plan d'eau, rayon env. 1,5 m.

qu'alors dépourvues de champ et situées bien en dehors du nuage.

Lorsque l'étincelle d'éclair ainsi formée touche également la terre après être sortie du nuage, une liaison complète s'établit entre le nuage et le sol, de sorte que l'équilibrage des tensions entre ces deux pôles peut se faire comme si un fil était tendu entre le nuage et le sol. Le courant d'équilibre dépasse en général sensiblement le courant primitif de l'étincelle; c'est pourquoi le parcours de l'éclair est dans la règle caractérisé par sa forte luminosité.

Quelques reproductions d'étincelles artificielles, ainsi que quelques récentes photographies d'éclairs illustreront ce qui vient d'être dit au sujet de la formation de l'éclair.

Les figures 5 et 6 montrent que la différence de grandeur, de forme et de bifurcation entre les décharges positives et négatives aux tensions de choc élevées (p. ex. sous 500 kV) peut être très faible. Les figures 7 à 9 ont été obtenues dans l'installation de choc à 3 millions de volts du Laboratoire Ampère de la Cie Générale d'Electro-Céramique, Paris, qui a eu l'amabilité de les mettre à ma disposition. Ces reproductions montrent que, sous haute tension, des *bifurcations peuvent se présenter simultanément du côté positif et du côté négatif de l'étincelle.* Le sens de la bifurcation de l'éclair ne permet donc pas d'en tirer des conclusions quant à la polarité du nuage, comme on l'a tenté il y a quelques années. A cette époque, Simpson croyait pouvoir affirmer que les nuages inférieurs sont chargés positivement par rapport au sol, en se basant sur des essais de modèles et sur le fait que presque tous les éclairs se bifurquent vers le bas. Or, nos oscillogrammes et une série d'autres mesures lors de coups de foudre ont montré que c'est précisément l'inverse qui se produit, c'est-à-dire que la plupart des éclairs amènent au sol des charges négatives. Puisque l'on a constaté pour les étincelles de choc que des bifurcatoins peuvent aussi se produire du côté négatif vers le côté positif, il est donc possible qu'un nuage chargé négativement donne des éclairs qui se bifurquent vers le bas, bien que moins fortement que dans le cas des éclairs provenant de nuages positifs.

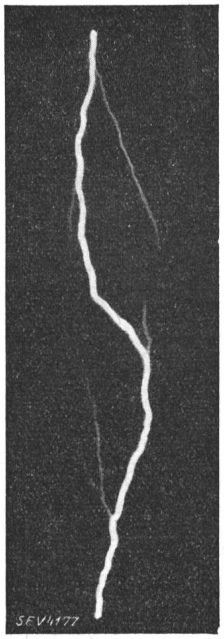
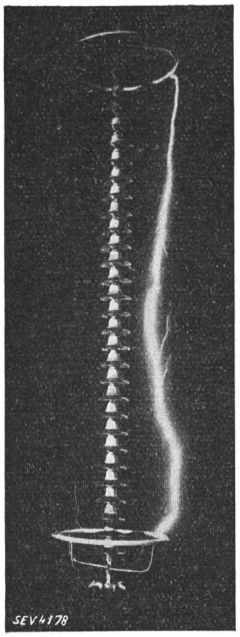


Fig. 7.
Etincelle de choc entre électrodes à pointes, sous env. 3 millions de volts. (Laboratoire Ampère, Paris).

La fig. 10 est une magnifique photographie d'un éclair prise par M. Meller, chef d'exploitation du Chemin de fer du Patscherkofel près d'Innsbruck, et déjà publiée par le Prof. Binder, Dresde. On remarque distinctement que la branche de l'éclair qui atteint le sol est plus claire que les autres branches qui n'ont pas été si loin. Enfin, les figures 11 et 12 montrent des éclairs à bifurcations très poussées et à faible bifurcation qui proviennent peut-être de nuages positifs et négatifs.

La figure de l'éclair, telle que nous venons de la décrire, semble être bien confirmée par les récentes observations de Schonland, Halliday et Collens,



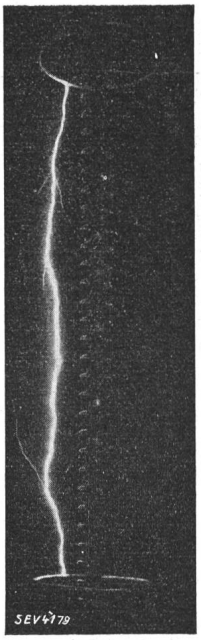


Fig. 8. Fig. 9.
Contournements par choc d'une chaîne d'isolateurs avec armatures à anneaux sous env. 3 millions de volts. (Laboratoire Ampère, Paris.)

Capetown. Les observations relatives aux surtensions ont en effet soulevé la question de savoir si l'éclair entre nuage et sol progresse réellement du nuage vers le sol ou au contraire du sol vers le nuage. Cette question, qui peut paraître un peu étrange, est cependant fondée par le fait que l'on observe souvent des décharges de nuages négatifs contre le sol positif.

Pour résoudre ce problème, ces savants utilisèrent la méthode optique du Prof. Boys, qui consiste à photographier l'éclair à l'aide de deux objectifs parallèles tournant très rapidement autour d'un axe commun. On aurait ainsi observé tout d'abord sur quelques-unes de ces photographies d'éclairs un phénomène lumineux qui part du nuage et qui présente l'aspect d'une flèche lumineuse d'environ 60 m de longueur, se déplaçant entre le nuage et le sol à la vitesse de 1300 à 32 000 km/s.

Lorsque la flèche lumineuse de l'éclair (qui correspond manifestement à la tête d'étincelle de Töpler) atteint le sol, il se produit au point de contact avec le sol une étincelle enflammée plus claire, qui remonte vers le nuage en suivant le parcours amorcé par la flèche. Cette étincelle remon-

tante se dirigerait vers le nuage à la grande vitesse de 24 000 à 210 000 km/s. Elle est manifestement le support du courant d'équilibre entre le sol et le nuage chargé négativement.

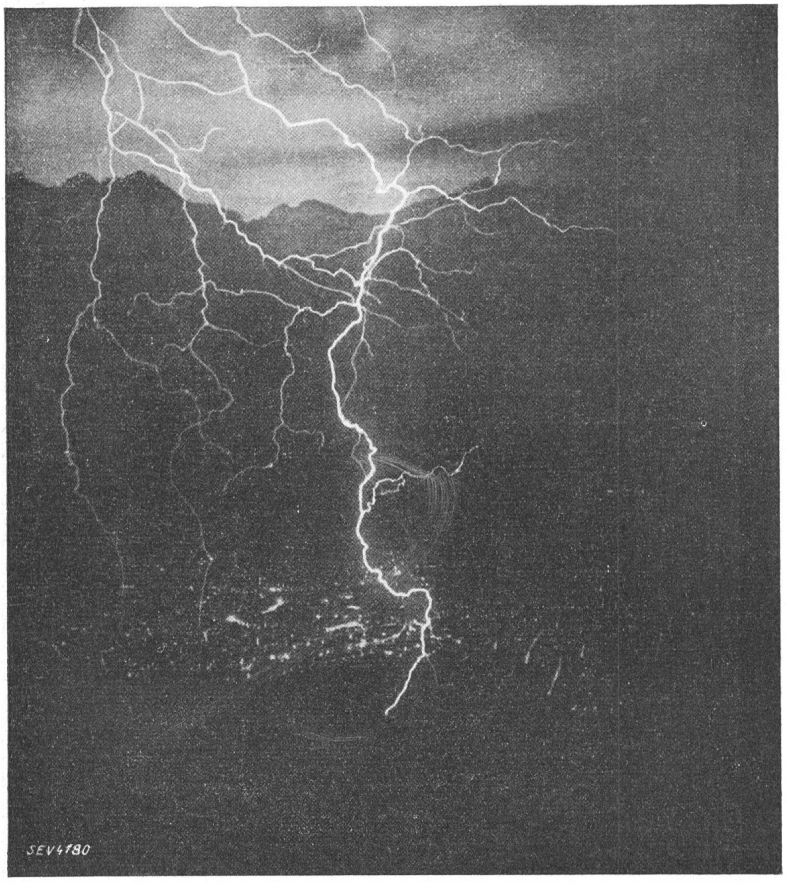


Fig. 10.
Photographie d'un éclair sur Innsbruck, prise par Mr. Meller, Directeur du Chemin de Fer de Patscherkofel.
(Bericht der Sondertagung über Blitzschutzfragen, Verb. Sächs. EW, 1932, p. 54.)

ceux qui viennent d'être décrits, parfois même jusqu'à 15 de suite. Ces éclairs partiels prennent souvent tous le même chemin, mais il arrive aussi que l'un ou l'autre s'écarte brusquement du précédent et prenne une autre direction. Cette décharge intermittente se présente d'ailleurs également dans les transformateurs d'essais à haute tension et les inducteurs; elle provient d'un manque de rapidité dans la fourniture de nouvelles charges électriques de l'intérieur du nuage, resp. de l'intérieur de l'enroulement.

La succession des éclairs partiels a été étudiée à fond par M. Walter, Prof. à Hambourg, qui photographia l'éclair simultanément avec un appareil fixe et avec un appareil en mouvement [3]). La fig. 13 montre distinctement ce phénomène et nous dispense de plus longues explications. En n'examinant que superficiellement ces photographies d'éclairs, on pourrait être amené à penser que l'éclair est constitué par un courant oscillant, dont les demi-périodes seraient rendues visibles par les diverses bandes lumineuses. L'écart irrégulier entre deux éclairs partiels successifs et leur délimitation précise montrent toutefois qu'il ne s'agit absolument pas d'une fréquence, mais d'une succession de chocs séparés, dont *aucun n'est d'ailleurs le siège de hautes fréquences. L'éclair est un courant continu de brève durée, qui peut être appelé avantageusement une décharge par choc.*

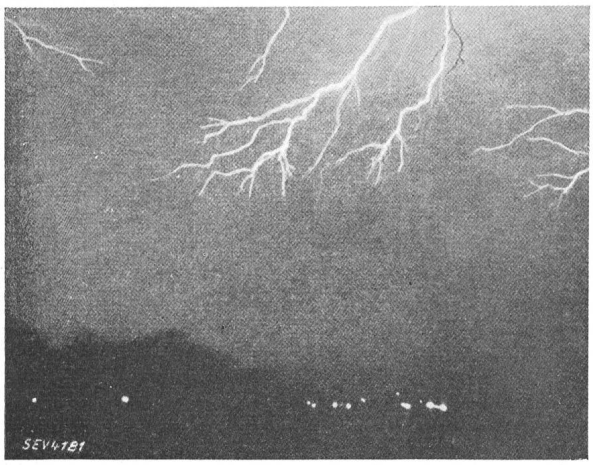


Fig. 11. Fig. 12.
Photographies de deux éclairs, provenant probablement de nuages positifs et négatifs. (Jensen, Frankl. Inst. 1933.)

Nous avons ainsi esquissé rapidement les principales caractéristiques de l'éclair. Nous ajouterons que, dans l'éclair complet, se suivent *souvent à brefs intervalles plusieurs éclairs partiels, comme*

Nous terminerons ici les considérations générales sur l'éclair lui-même. Nous ne pouvons malheureusement pas nous étendre sur les détails et les

[3]) B. Walter: Phys. Z., Vol. 13 et 14, 1913; Vol. 19, 1918.

formes spéciales des éclairs (éclairs en boule, en chapelet, etc.). Ce qui nous intéresse en tant qu'électriciens, ce sont surtout les perturbations que provoque la foudre dans les installations. Je parlerai donc maintenant de ces effets électriques de la foudre.

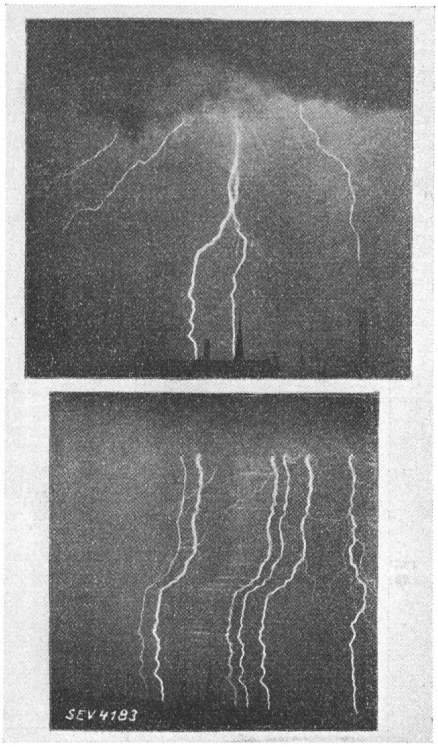


Fig. 13.
Photographie d'un éclair, prise en haut avec un appareil fixe et en bas avec un appareil en mouvement. (Walter. Phys. Z. 1918.)

III.

Avant la formation de l'éclair, les charges des nuages se font déjà remarquer par une modification du champ électrique au sol. Comme nous l'avons dit au début, il existe toujours un champ électrique au sol, même par temps calme. On constate par exemple que des corps parfaitement isolés à 1 m au-dessus du sol prennent une tension de + 100 à + 400 V contre le sol. Ces valeurs varient selon l'heure de la journée et la saison, ainsi que selon l'endroit et les conditions atmosphériques. A l'approche d'un orage, ces faibles intensités de champ présentent des différences de potentiel beaucoup plus considérables, pouvant être jusqu'à 1000 fois plus grandes; ainsi, on a souvent mesuré 100 kV/m, voire même jusqu'à 300 kV/m, en Amérique [4]). Cela signifie que chaque corps suffisamment isolé peut atteindre peu à peu cette tension au cours d'un orage, quand il se trouve à 1 m au-dessus du sol. S'il se trouve à 10 m de hauteur, cette tension est 10 fois plus élevée, etc. L'exemple le plus frappant de ces tensions électriques atmosphériques en cas d'orage est certainement celui des essais effectués avec la grande antenne du Monte Generoso, près de Lugano [5]). A cet endroit était tendu au-dessus de la pente ouest un câble d'acier d'env. 600 m de longueur auquel était attaché un réseau de fils de fer. Ce câble fut d'abord maintenu par des chaînes de 33 isolateurs du type Motor, puis dans la suite par des cordes de chanvre imprégnées de 50 m de longueur chacune. Du milieu du câble pendait, jusqu'à quelques mètres au-dessus du sol, un câble de dérivation muni, comme un collier de perles, d'une série de gros corps creux destinés à diminuer les effluves. A l'approche d'un orage, on pouvait constater des claquages de plus de 10 m entre antenne et terre, accompagnés d'étincelles tonnantes. La tension de l'antenne atteignait 10 millions de volts contre la terre, ceci non pas par suite de coups de foudre, mais uniquement parce qu'elle se chargeait peu à peu au potentiel des nuages environnants. Pour la plus grande distance disruptive, une durée de charge de ½ minute suffisait, voire même 1 seconde seulement pour des longueurs d'étincelles de 4,5 m. C'est à cette fréquence que les étincelles de décharge sautaient à la terre avec vacarme.

Après des expériences aussi impressionnantes, le service des lignes aériennes pendant un orage devrait nous faire réellement peur. Les Américains ont d'ailleurs calculé, il y a deux ans, que des tensions de 3 millions de volts peuvent être induites au cours des orages dans une ligne à haute tension sans fil de terre, à 15 m au-dessus du sol. Ce calcul est bien simple: 15 m de hauteur au-dessus du sol et 200 kV/m d'accroissement de tension font $15 \times 200 = 3000$ kV sur la ligne. Ce calcul ne présente qu'un seul défaut: il ne tient pas compte de la vitesse de *variation du champ électrique atmosphérique*. Il suppose que les énormes intensités de champ indiquées peuvent s'annuler en un clin d'œil, en un millionième de seconde environ, lorsqu'un éclair décharge brusquement le nuage. Par contre, quand la formation et la déformation des champs considérables des nuages n'a pas lieu brusquement, mais lentement, la charge dite «statique» a le temps de s'écouler à la terre par la résistance d'isolement de la ligne et par des parties du réseau éloignées, de sorte que seule une partie de la tension calculée entre en action, ce qui est heureusement le cas.

Dire que l'équilibre du champ se fait «lentement» est naturellement une façon de parler propre aux personnes qui s'occupent de la protection contre la foudre et des surtensions, et pour lesquelles l'unité de temps est actuellement en général la microseconde, c'est-à-dire la millionième partie d'une seconde. Cela tient d'une part à la rapidité de propagation des ondes électriques qui parcourent les lignes aériennes à la vitesse de près de 300 m à la microseconde et, d'autre part, à l'usage de l'oscillographe cathodique, qui nous rend visible la microseconde (μs) aussi bien et aussi simplement que l'ancien oscillographe nous montrait le

[4]) A. Matthias: Conf. Mond. Energie 1930, Etude des orages et protection contre la foudre. Norinder: Undersökuingar över det luftelektriska fälet vid äskväder, Upsala 1921; W. Lewis: Gen. El. Review 1930, p. 197; El. Engr. 1931, p. 482.

[5]) Brasch, Lange et Urban: Naturwiss., Vol. 16, 1928.

$^1/_{100}$ de seconde. Il s'ensuit que, pour ceux qui s'occupent de ces phénomènes extra-rapides, une durée de 100 ou même de 1000 μs, c'est-à-dire de $^1/_{10000}$ ou $^1/_{1000}$ de seconde, semble très longue!

La vitesse de modification du champ électrique atmosphérique présente sa valeur maximum à l'instant d'un coup de foudre. Les plus grandes surtensions induites se produisent à ce moment, mais n'atteignent, selon nos mesures oscillographiques, que des valeurs de l'ordre de 120 à 150 kV_m ou en chiffre rond 100 kV_e sur les lignes à haute tension avec un câble de terre [6]). Nous sommes amenés à parler maintenant de nos mesures systématiques

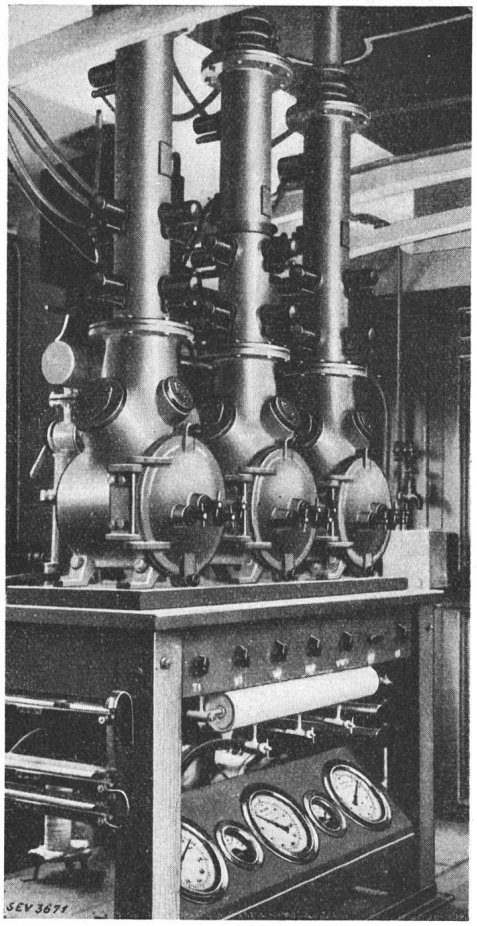


Fig. 14.
Vue de notre oscillographe cathodique tripolaire monté dans un wagon aménagé spécialement pour les mesures.

effectuées au cours de ces dernières années sur les surtensions dans les lignes à haute tension dues aux orages. On sait que des tensions variant avec une aussi grande rapidité que celles dues à la foudre ne peuvent être mesurées que par les oscillographes cathodiques (OC). Seuls ces appareils sont capables de noter sans inertie des variations de tensions électriques s'étendant sur une ou quelques microsecondes, car ils ne comportent ni miroir, ni masse pesante, mais uniquement un jet d'électrons libres, c'est-à-dire des rayons cathodiques. Jusqu'à 100 millions de périodes par seconde, aucun phénomène d'inertie n'entre donc en ligne de compte pour un OC. Je ne ferai pas la description d'un tel appareil; je me bornerai à montrer un cliché de notre appareil tripolaire

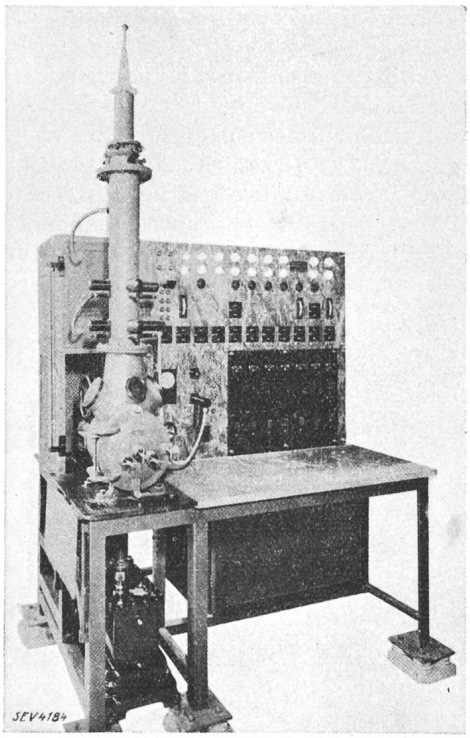


Fig. 15.
Vue d'un oscillographe cathodique unipolaire, construction Trüb, Täuber & Cie.

monté dans une voiture de chemin de fer, puis d'un autre appareil construit d'après nos indications par la maison Trüb, Täuber & Cie, ainsi que quelques clichés de l'installation de mesure fonc-

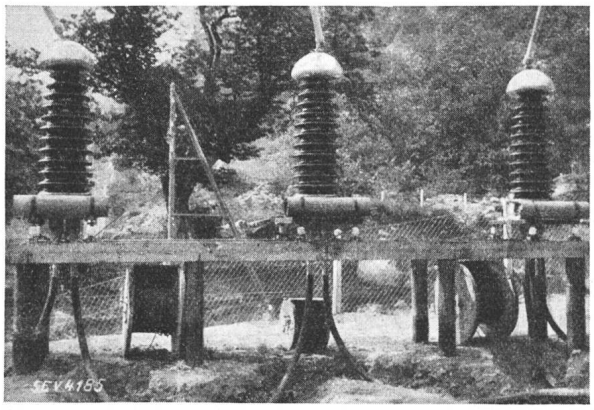


Fig. 16.
Vue des trois diviseurs de tension pour 150 kV à Lavorgo (câbles à huile et résistances mannite).

tionnant cette année à Lavorgo sur la ligne du Gothard.

Le raccordement de l'OC nécessaire aux mesures sur la ligne du Gothard de 150 kV a eu lieu à l'aide de trois câbles à huile qui ont été mis à

[6]) K. Berger: Bull. ASE 1928 à 1933.

notre disposition et montés gratuitement par les Câbleries de Brougg S. A. La fig. 18 montre non seulement le diviseur de tension pour l'OC, mais également le raccordement d'un clydonographe qui est un simple instrument enregistrant la grandeur et la fréquence approximatives des surtensions.

Les résultats que nous avons obtenus avec notre OC triphasé sont brièvement les suivants:

Parmi les relevés des surtensions des trois phases de la ligne au cours d'orages, on en rencontre tout d'abord un grand nombre qui ne représentent que de *faibles surtensions* sans aucun danger pour le service. L'allure de ces surtensions de perturbation, qui paraissent superposées à la tension de service

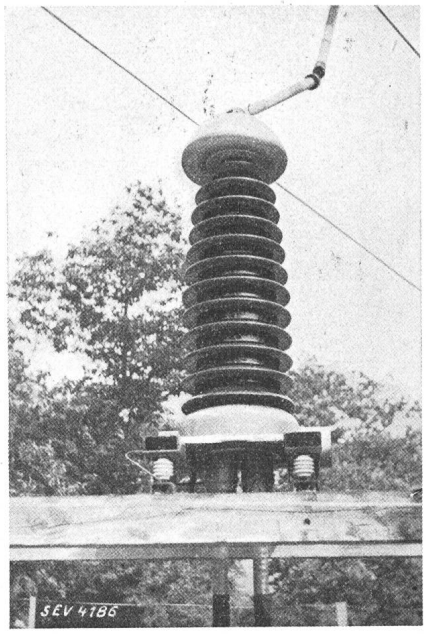


Fig. 17.
Vue d'une boîte d'extrémité de câble 150 kV à Lavorgo (Centrale de Monte Piottino de l'Ofelti).

contre la terre, est presqu'identique dans les trois phases. Ces surtensions ne se produisent toujours qu'au moment de coups de foudre à proximité de la ligne; elles sont manifestement dues à l'action purement capacitive des nuages sur les câbles de la ligne, c'est-à-dire à la modification du champ électrique atmosphérique durant les coups de foudre. Bref, ce sont les ondes de surtensions dues aux *coups de foudre indirects.*

Jusqu'à présent, la valeur maximum de ces surtensions indirectes a été enregistrée à l'extrémité d'une ligne de 80 kV sur pylônes en fer, dans une station sans aucune mise à la terre du neutre. Les tensions atteintes sont d'env. 300 kV_m contre la terre. Comme il se produit à l'extrémité de la ligne une élévation à la valeur double, l'amplitude de l'onde incidente devait atteindre environ 150 kV_m. De ces surtensions indirectes maxima mesurées jusqu'ici, on peut conclure que les effets indirects de la foudre ne peuvent en général pas provoquer de contournements sur des lignes dont la tension de service est au minimum de 50 kV et qui sont munies d'un câble de terre. Toutefois, du fait de la superposition de l'onde réfléchie à l'onde incidente, elles peuvent provoquer des contournements sur les lignes de 50 kV non protégées et, exceptionnelle-

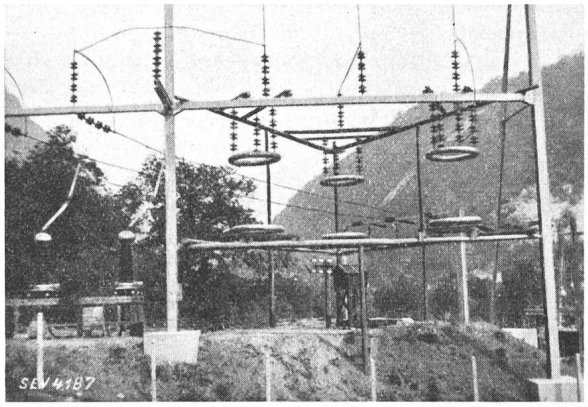


Fig. 18.
Clydonographe triphasé à Lavorgo.

ment dans des stations de tête de 80 kV non protégées. En cas de tensions de service plus élevées, seuls les *coups de foudre directs* peuvent provoquer des mises à la terre accidentelles et des courts-circuits. Afin de pouvoir décider à la simple lecture des oscillogrammes (sans que la ligne soit munie d'enregistreurs de coups de foudre) s'il s'agit dans tel ou tel cas d'une action indirecte de la foudre

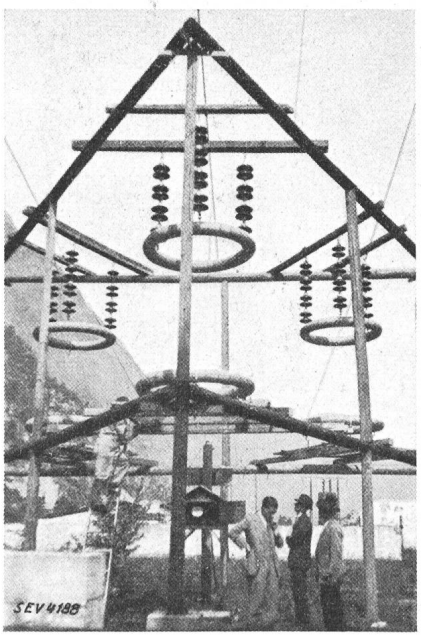


Fig. 19.
Clydonographe triphasé à Bodio.

ou d'un coup de foudre direct, nous avons observé simultanément les trois phases de la ligne, ce qui nécessitait naturellement un OC tripolaire. On peut ainsi reconnaître très distinctement un coup de foudre direct en comparant les oscillogrammes des trois phases: Non seulement *une seule* des phases

présente dans la règle une énorme surtension, mais en outre les phases saines présentent même une polarité inverse du front de l'onde de surtension. Ce phénomène remarquable et inattendu a été expliqué depuis lors par des tensions d'éclairs artificiels, mais elles ont tout d'abord fort intrigué. C'est un

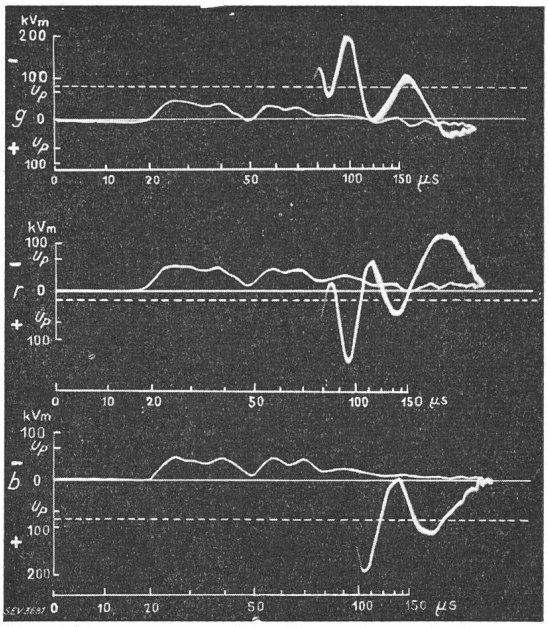


Fig. 20.

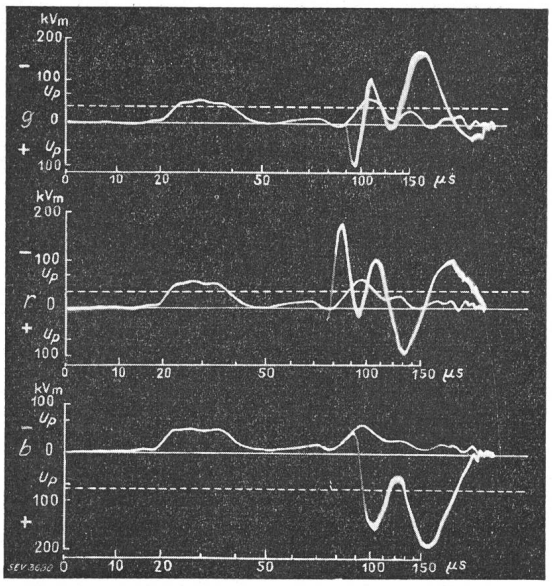


Fig. 21.
Ondes de surtensions indirectes engendrées par la foudre sur les trois phases d'une ligne à 80 kV.

exemple du cas où l'observation de phénomènes naturels est en avance sur la théorie des ondes. La raideur des surtensions provoquées par le coup de foudre direct, c'est-à-dire la rapidité de son accroissement, est beaucoup plus grande que celle des surtensions indirectes.

Après cette constatation intéressante de l'importance des coups de foudre directs sur les lignes à haute tension, la question suivante se pose immédiatement: *La foudre tombe-t-elle sur les pylônes, sur les conducteurs de phases ou sur le fil de terre?* A ce sujet, les statistiques de service indiquent tout d'abord un phénomène intéressant. Des lignes à 100 kV avec un câble de terre et trois câbles de phase disposés dans un plan vertical ont montré qu'en cas d'orage le câble de la phase supérieure était en effet soumis un peu plus fréquemment à des mises à la terre que les deux câbles inférieurs. Cependant, la différence n'est pas très grande, surtout par rapport au câble le plus bas, qui présente dans certains services presque autant de perturbations dues aux orages que le câble supérieur le plus exposé aux coups de foudre [7]). Comment peut-on l'expliquer? Ce phénomène s'explique par ce que

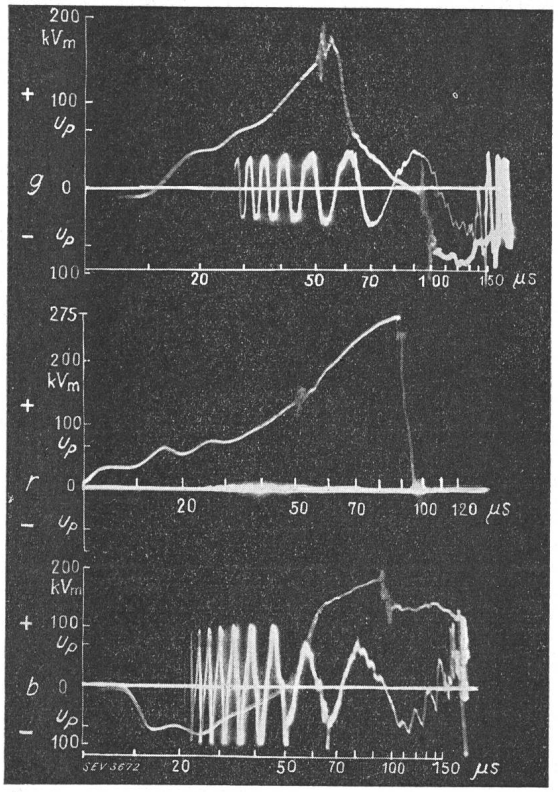


Fig. 22.
Surtension indirecte engendrée par la foudre, suivie d'une perturbation dans une station de tête à 80 kV.

l'on appelle le *claquage en retour d'un pylône en cas de coup de foudre.* Supposons qu'un pylône soit atteint par la foudre. Comme nous l'avons vu précédemment, un courant qui croît rapidement jusqu'à des valeurs considérables s'établit entre le pylône et le nuage. Ce courant s'écoule de la terre ou vers elle, ceci principalement à travers la résistance de terre du pylône touché par la foudre et, dans une plus faible mesure, par le câble de terre vers les pylônes voisins. Il se produit ainsi dans la terre du pylône une chute de potentiel selon la Loi d'Ohm bien connue; par exemple pour un courant de 20 000 A_m et une résistance de 20 ohms, en obtient une tension de $20 \times 20\,000 = 400$ kV_m ou env. 280 kV_e. Dans les lignes sans câble de terre, cette tension met à contribution les isolateurs de la ligne. Quand ces isolateurs sont insuffisants, il se produit

[7]) Ph. Sporn: Trans. Amer. Inst. Electr. Engr. 1929 à 1933.

un contournement et ainsi un passage de la tension de la terre du pylône aux phases de la ligne. Lorsque la ligne est munie d'un câble de terre, celui-ci est sous tension en même temps que le pylône, lors d'un coup de foudre, et protège ainsi plus efficace-

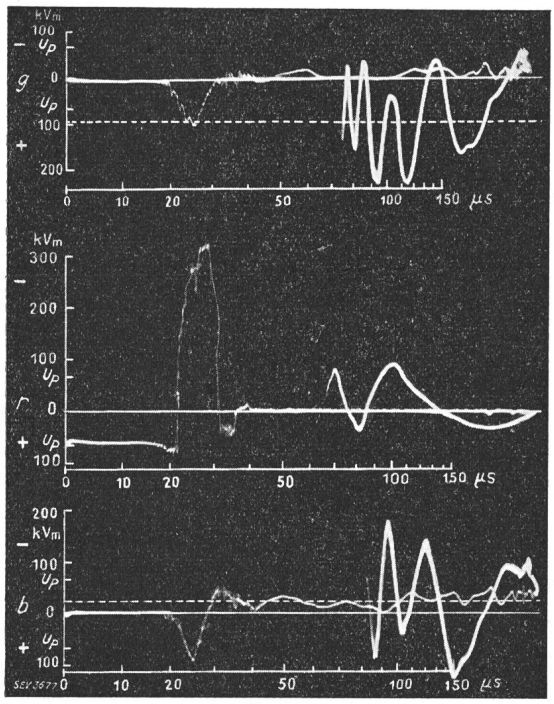


Fig. 23.

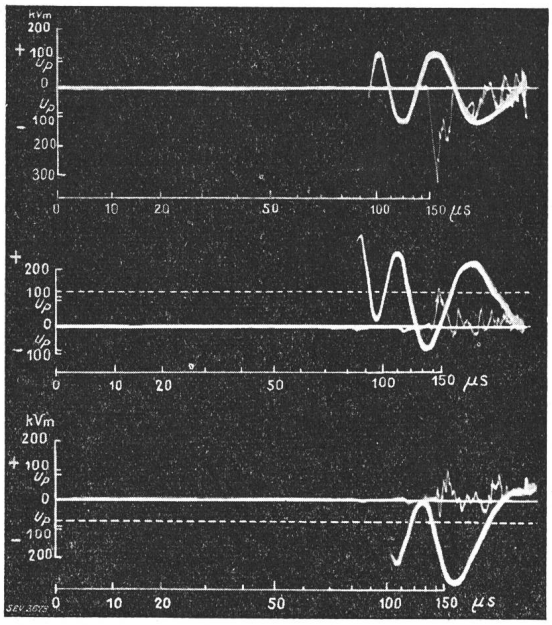


Fig. 24.
Ondes de surtensions engendrées par des coups de foudre directs sur des lignes à 80 et 132 kV, suivies d'une perturbation due à une mise à la terre accidentelle.

ment le câble de la phase supérieure voisine que les câbles inférieurs. C'est pourquoi les isolateurs de ces derniers sont soumis à de plus grandes différences de potentiel que ceux du câble supérieur, raison pour laquelle, dans les lignes avec câble de terre, les câbles des phases inférieures sont plus volontiers affectées par le claquage en retour.

L'importance pratique des coups de foudre directs fait que l'on s'occupe beaucoup actuellement de la grandeur des courants engendrés par la foudre. Cette question qui était autrefois d'un ordre purement scientifique acquiert aujourd'hui pour la protection des lignes une importance beaucoup plus grande que celle de la tension due à la foudre, qui était jusqu'ici au premier plan.

La mesure des courants engendrés par la foudre n'est pas facile. En effet, où doit-on procéder aux mesures? On a proposé, il est vrai, de lancer de fortes fusées munies d'une queue de flammes ou même de fils métalliques, pour aller chercher la

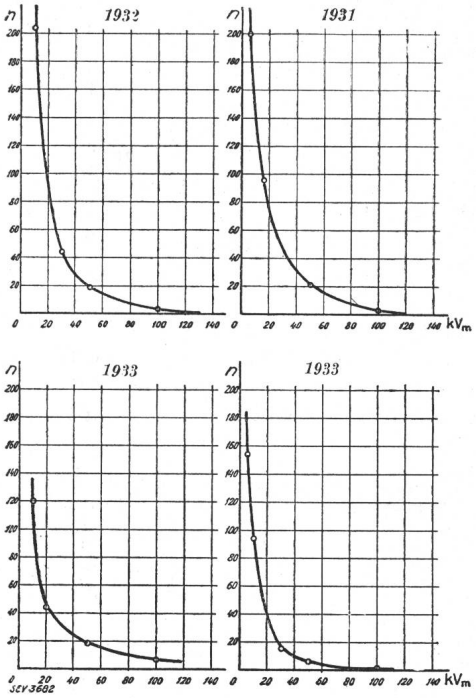


Fig. 25.
Diagrammes de la fréquence de surtensions atmosphériques de différentes valeurs, relevées à l'oscillographe cathodique, dans la station de tête à 80 kV / dans la station à 132 kV
Ordonnée n = Nombre des surtensions par semestre d'été, dont la valeur atteint ou dépasse la valeur d'abscisse.

foudre dans les nuages d'orage. Mais même si cela était réalisable, cette foudre n'aurait probablement pas la même intensité que la foudre essentiellement naturelle. Il ne reste donc qu'à monter des instruments de mesure à de nombreux endroits, surtout là où on peut s'attendre à ce que la foudre tombe. Nous avons ainsi équipé d'éclateurs spéciaux un grand nombre de pylônes de lignes à très hautes tensions en Suisse. Ces éclateurs indiquent par la perforation d'une calotte en celluloïde si la foudre qui a touché le pylône atteignait ou non une certaine intensité dans le pylône. Selon une méthode allemande, dont le principe est déjà très ancien, on place près des paratonnerres et des pylônes un bâtonnet d'acier ou mieux encore un *faisceau de minces fils d'acier*, auxquels le courant engendré par la foudre imprime un certain magnétisme rémanent [8]). La force de la rémanence indique alors l'ordre de grandeur du maximum de courant dû à

[8]) H. Grunewald: ETZ 1934, No. 21 et 22.

la foudre. Il est intéressant de rappeler à ce sujet que Pockels et Töpler ont appliqué les premiers ce principe pour mesurer le courant dû à la foudre, il y a déjà de nombreuses années; ils n'utilisaient pas des bâtonnets d'acier, mais examinaient à la boussole les contrées à roches basaltiques. Ils estimaient le courant engendré par la foudre à la magnétisation circulaire des roches basaltiques dans le sol [9]). Nos mesures de ces trois dernières années ont indiqué pour ce courant des valeurs allant de *quelques 1000 A_m à 100 000 A_m*, en chiffres ronds. Les mesures allemandes, publiées il y a quelques mois, indiquent des valeurs de *quelques 1000 A_m à 60 000 A_m* au maximum. Les valeurs les plus fréquentes pour les courants dûs à la foudre sont donc probablement de 10 000 à 40 000 A_m [8]). Les mises à terre de protection doivent supporter par à-coups des courants de cet ordre de grandeur. Il n'est donc pas étonnant que de fortes étincelles de claquage se produisent ou que des socles de béton soient fendus, lorsqu'une liaison de terre est défectueuse ou dans le cas d'autres masses métalliques non reliées à la ligne (surtout lorsqu'elles sont également mises à la terre), telles que les conduites d'eau, les barrières métalliques et les rails.

Les mesures américaines [10]) indiquent pour ces courants des valeurs encore plus élevées, atteignant jusqu'à 600 000 A_m. Nous croyons toutefois que ces valeurs sont trop élevées, ce qui provient d'une méthode de mesure peu appropriée. Les calculs du courant basés sur les *effets de fusion par le courant dû à la foudre* sont incertains, car la fusion dépend également de la durée du courant, que l'on ne peut généralement pas déterminer d'après les traces de fusion. En observant que des fils de cuivre de 2 mm de diamètre sont assez facilement fondus par la foudre, on obtient également des valeurs allant jusqu'à 100 000 A_m en estimant raisonnablement la durée du courant [11]). On obtient des courants du même ordre de grandeur en observant les *effets électrodynamiques* dans les fils parcourus par la foudre, qui laisse parfois des traces tout à fait remarquables [12]).

IV.

Un résumé des principales valeurs concernant la foudre, qui selon les connaissances actuelles doivent assez bien correspondre à la réalité, présente un certain intérêt.

a) La tension entre les extrémités de l'éclair va de 100 à quelques 100 millions de volts. Des tensions de 10 millions de volts ont été mesurées à l'OC sur des lignes à poteaux de bois en Amérique. La tension de 1000 millions de volts (1 million de kV) estimée par Wilson constitue probablement la limite supérieure des tensions des nuages d'orages.

b) L'intensité du courant de la décharge doit atteindre, comme nous l'avons dit, 100 000 A_m et varier habituellement entre 10 000 et 40 000 A_m. La décharge est formée d'une ou de plusieurs décharges élémentaires, dirigées toutes dans le même sens. Elle n'est jamais oscillante.

c) La polarité des décharges par rapport au sol est dans la grande majorité des cas telle que les nuages négatifs se déchargent vers le sol (positif).

d) La durée d'une décharge élémentaire est d'au moins 50 μs, c'est-à-dire d'au moins $^1/_{20000}$ de seconde.

La *durée de la décharge complète* comportant jusqu'à 15 décharges élémentaires est d'env. 1 s.

e) La vitesse de propagation de l'éclair vers la terre est de l'ordre de 10 000 km/s.

f) Valeur maximum mesurée jusqu'à présent d'une façon certaine pour les surtensions indirectes dues à la foudre sur une ligne à pylônes métalliques avec câble de terre: environ 150 kV_m ou 100 kV_e; sur une ligne sans câble de terre: environ 150 kV_e (estimation).

g) Surtension maximum possible due à la foudre sur une ligne à pylônes en fer: Egale à la tension de contournement par choc des isolateurs de la ligne. Sur une *ligne à poteaux en bois:* Egale à la tension de contournement par choc des poteaux en bois, donc quelques millions de volts.

h) Raideur maximum du front des ondes de surtension: A l'endroit touché par la foudre 1000 à 10 000 kV/μs; dans les stations, rarement plus de quelques centaines de kV/μs.

V.

Enfin, en ce qui concerne les mesures de protection et les expériences de ces dernières années, je serai assez bref. On constate par exemple le progrès réalisé au cours de ces dernières années par le fait que la plupart des mesures de protection modernes sont précisément dirigées (souvent avec succès) contre les coups de foudre directs qu'il paraissait impossible de rendre inoffensifs il y a quelques années.

Dans le cas des lignes à pylônes en fer, on a obtenu une plus grande sécurité de service au cours d'orages par une *amélioration des terres des pylônes.* Cette amélioration semble être tout particulièrement notable pour les lignes à 100 kV où les résistances de terre de 100 ohms et plus par pylône ont été réduites à env. 10 ohms. On a moins d'expériences en ce qui concerne une meilleure disposition des câbles de terre.

Dans les cas où l'on ne peut éviter des contournements d'isolateurs dûs à de mauvaises terres ou au défaut du câble de terre pour les lignes à pylônes en fer, les *armatures pare-arcs* (cornes, anneaux, etc.) constituent un bon moyen d'éviter de grosses avaries d'isolateurs. L'expérience de ces dernières années a montré que la plupart des bris d'isolateurs au cours d'orages ne sont pas dûs à la tension de choc par la foudre, mais bien à l'arc du court-circuit subséquent maintenu par la tension de service. Nous ne tenons naturellement pas

[9]) F. Pockels: Meteor. Z., Vol. 15, 1898, et Vol. 18, 1901.

[10]) W. Lewis et C. M. Foust: Lightning Investigation on Trans. Lines, II. El. Engr. 1931, p. 479 et 483.

[11]) Description d'un coup de foudre extrêmement violent: Janetzki: ETZ 1928, p. 1376.

[12]) Ch. Morel: Bull. ASE 1933, p. 209; R. S. Spilsbury: Nature 1931, p. 872.

compte des perforations provenant d'une défectuosité antérieure des isolateurs, de fissures, etc.

Par contre, les résultats sont fort mauvais pour toutes les *lignes à poteaux en bois*, même pour celles à très hautes tensions de service. L'augmentation de l'isolement pratiquée en Amérique en utilisant largement la valeur d'isolement du bois n'a donné aucune amélioration. Pour cette catégorie de lignes, la célèbre boutade de Steinmetz: «En cas d'orage, réparez ce qui est cassé et soyez heureux que le dommage n'ait pas été plus grand!» conserve encore sa valeur. On connaît bien quelques moyens pour éviter le bris des poteaux, mais ils ne sont encore guère employés.

Une *ligne résistante à la foudre* semble n'être économiquement possible qu'à partir de tensions de service d'environ 100 kV et au-dessus, exceptionnellement à 50 kV. *Pour les installations à haute tension jusqu'à 60 kV environ, on a eu de nouveau recours, durant ces dernières années, aux parasurtensions.* Ces dispositifs peuvent d'ailleurs être actuellement dimensionnés et essayés correctement. Mais une certaine circonspection est toujours indiquée, car tout ce qui brille n'est pas or!

Il y a aujourd'hui dix ans qu'en Suisse nous avons abandonné les *parasurtensions*. Nous devons donc maintenir aujourd'hui notre point de vue de cette époque là, à savoir qu'il faut éviter de réintroduire des appareils n'étant pas eux-mêmes d'un fonctionnement sûr! Dans le but de pouvoir essayer dans des conditions normales de service les appareils contre les surtensions, nous avons monté, près de la Centrale de Gösgen, une installation d'essai par chocs, grâce à l'appui bienveillant de l'Usine électrique d'Olten-Aarburg, des Câbleries de Brougg S. A., des Chemins de Fer Fédéraux, de la S. A. Brown, Boveri & Cie, et d'autres participants. Il nous a été ainsi possible de poursuivre activement les recherches commencées à Puidoux en 1931 sur les parasurtensions. *L'époque n'est probablement plus éloignée* où des contournements dûs aux surtensions dans les installations elles-mêmes appartiendront au passé ou seront en tout cas très rares. Sans oscillographe cathodique, ce progrès serait inconcevable.

J'espère vivement que nos recherches théoriques et pratiques présenteront également à ce point de vue des avantages directs pour les centrales électriques et les réseaux de distribution, surtout pour ceux qui, par leur précieux concours, ont facilité l'exécution de ces recherches. Je profite de l'occasion pour remercier sincèrement les personnes, les centrales et les entreprises qui nous ont effectivement soutenu dans nos travaux.

La foudre et les bâtiments.

Conférence donnée à l'assemblée générale de l'ASE le 7 juillet 1934 à Aarau
par *Ch. Morel*, ingénieur au Secrétariat général de l'ASE, Zurich.

31:551.594.2(494)

L'exposé ci-dessous se borne à relater quelques-uns des plus intéressants coups de foudre relevés au cours de l'enquête menée par le secrétariat général de l'ASE et de l'UCS, pour en tirer quelques conclusions pratiques relatives à la protection des bâtiments: suppression des pointes, utilisation de toutes les parties métalliques extérieures pour former un réseau protecteur, rôle des lignes aériennes et des arbres, etc.

Quelques-uns des cas produits ayant déjà été décrits antérieurement, on s'est contenté ici de faire figurer à côté de leur numéro d'ordre, un renvoi au numéro du Bulletin où s'en trouve la description détaillée.

Das hier wiedergegebene Referat ist eine kurze Aufzählung einiger der interessantesten Blitzschläge aus den Erhebungen des Generalsekretariates des SEV und VSE während der letzten Jahre. Dieser Aufzählung sind einige praktische Folgerungen für den Schutz der Gebäude beigefügt: Weglassung der sog. Auffangstangen, Heranziehung aller äusseren Metallteile zur Bildung eines schützenden Netzes, Bedeutung der Freileitungen und der Bäume usw.

Da einige der angeführten Fälle bereits früher beschrieben wurden, ist hier neben ihrer Ordnungsnummer nur auf die Nummer des Bulletin verwiesen, wo sich die ausführliche Beschreibung befindet.

De tous temps, la foudre a attiré l'attention des hommes de science aussi bien que celle des simples mortels. Ses méfaits et surtout ses caprices ont donné lieu à nombre de croyances populaires, erronées pour la plupart, mais qui s'expliquent d'autant plus facilement qu'à l'heure actuelle les savants même ne sont pas encore d'accord sur tous les points. Dans sa conférence, M. Berger a esquissé l'état actuel de nos connaissances sur la foudre en tant que phénomène électrique. Ce qui suit ne sera donc qu'une relation de quelques faits qui se sont passés au cours de ces dernières années, accompagnée de quelques conclusions pratiques pour la protection des bâtiments. Ces cas sont pour la plupart tirés de l'enquête menée par le secrétariat général depuis 1931 avec la collaboration des établissements cantonaux d'assurance contre l'incendie et de l'administration des PTT, auquels nous nous devons d'exprimer ici notre reconnaissance.

Cette enquête a été ordonnée par la commission de l'ASE pour la protection des bâtiments contre la foudre, présidée avec une rare compétence par M. Blattner, professeur au technicum de Berthoud, dans le but de recueillir des indications pouvant servir de base à la revision des directives pour la protection des bâtiments contre la foudre. Ces recherches prouvent que les principes directeurs, émis dans les premières directives de 1907 ont conservé leur pleine valeur, de sorte que la revision n'a dû porter que sur des questions de détail qui, pour la plupart, ne se posaient encore pas alors.

Il est encore bien des gens qui ne peuvent se représenter un paratonnerre sans une ou plusieurs tiges de quelques mètres de haut, juchées sur le faîte de l'édifice à protéger. On a en effet cru au début que les pointes avaient le pouvoir de décharger les nuages chargés d'électricité, rendant ainsi impossible toute étincelle entre le nuage et le bâti-