

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telefon 23 77 44
Postcheck-Konto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

37. Jahrgang

Nr. 12

Samstag, 15. Juni 1946

Recherches suisses sur la foudre Mesures effectuées au Monte San Salvatore, près de Lugano*)

Par K. Berger, Zurich

621.317.2 : 621.3.027.7(494)
551.594.221

Ce rapport décrit tout d'abord l'installation aménagée sur le Monte San Salvatore, près de Lugano, pour la mesure oscillographique du courant de foudre. Cette installation comporte notamment une tour paratonnerre de 70 m de hauteur et une cage de Faraday renfermant divers oscillographes, qui mesurent la variation du courant de foudre passant par un shunt. L'enregistrement complet du processus s'opère à l'aide d'un oscillographe à boucles adapté à ce but, tandis que les variations rapides du courant de foudre sont enregistrées par deux oscillographes cathodiques équipés d'un relais de balayage universel d'un nouveau genre.

Quelques-uns des oscillogrammes relevés durant les orages de 1943 à 1945 sont indiqués à titre d'exemple et commentés. L'attention est attirée sur la grande diversité d'allure du courant de foudre. Les recherches seront poursuivies ces prochaines années.

Im Bericht wird zunächst eine für die oszillographische Messung des Blitzstromes auf dem Monte San Salvatore bei Lugano errichtete Meßstation beschrieben, die aus einem 70 m hohen Blitzableiter und einem Faraday-Messkäfig mit einigen Oszillographen besteht. Diese messen mit Hilfe eines vom Blitzstrom durchflossenen Shuntens den Stromverlauf. Für die Aufzeichnung des Gesamtverlaufs dient ein speziell für Registrierzwecke entwickelter Schleifen-Oszillograph, für die rasch veränderlichen Anteile des Blitzstromes dagegen 2 Kathodenstrahl-Oszillographen mit einem neuartigen universellen «Zeitrelais».

Einige der in den Gewitterperioden 1943...45 erhaltenen Oszillogramme werden als Beispiele gezeigt und besprochen. Auf die grosse Mannigfaltigkeit im Stromverlauf des Blitzes wird hingewiesen. Weitere Forschungen sind für die nächsten Jahre vorgesehen.

L'installation d'essai

Les mesures de surtensions effectuées en Suisse à l'aide de l'oscillographe à rayons cathodiques sur plusieurs lignes de transport d'énergie à haute tension, durant les dix années qui précédèrent la guerre, ont montré que les coups de foudre directs sont la principale cause de perturbations dans ces lignes, tout au moins dans nos régions¹⁾.

Soucieuse d'étudier plus en détail les perturbations provoquées par la foudre, la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH) a aménagé vers la fin de 1942 une tour paratonnerre, haute de 70 m sur le Monte San Salvatore, qui domine la ville de Lugano. Les coups de foudre atteignant cette tour y sont enregistrés en faisant passer le courant par un shunt spécial et en relevant sa variation à l'aide d'un oscillographe. Des recherches analogues ont déjà été entreprises, avant la guerre, à l'Empire State Building de New York²⁾. Grâce à la hauteur considérable de ce gratte-ciel, dont le sommet se trouve à 388 m au-dessus du sol, M. McEachron a pu observer 68 coups de foudre directs en trois ans. Les constatations optiques faites jusqu'ici ont montré que les coups de foudre qui atteignent cette «pointe»

* Rapport présenté à la CIGRE 1946.

¹⁾ Berger, K.: Gewittermessungen der Jahre 1936 und 1937. Bull. ASE t. 34(1943), no. 13, p. 353...365.

²⁾ Berger, K.: Zum Stand der Gewitterforschung. Bull. ASE t. 34(1943), no. 10, p. 269...275. — McEachron, J. Franklin Inst. 1939, février.

(Traduction)

extraordinairement élevée n'ont pas la même allure qu'en plaine. Il était donc intéressant de procéder



Fig. 1.

Tour paratonnerre de 70 m au sommet du Monte San Salvatore, vue du sud-ouest

à des essais dans des conditions plus naturelles et d'étendre le champ des recherches dans ce domaine.

Le *Monte San Salvatore* est à l'altitude de 915 m au-dessus du niveau de la mer, soit 641 m au-dessus du niveau du lac de Lugano. Cette montagne a un assez long prolongement vers le sud-ouest et un



court contrefort au nord-est, tous deux à mi-hauteur. Le sommet est donc bien dégagé de tous côtés. Au point de vue géologique, il s'agit de roches calcaires effritées, recouvertes d'un peu d'humus sur les versants garnis de forêts.

Le *paratonnerre* (fig. 1) est constitué par une tour en bois de 70 m de hauteur, surmontée d'une pointe en tube de fer de 10 m. Il est haubanné de quatre côtés par des câbles d'acier fixés à 5 étages de la tour. La pointe et les haubans sont reliés à la descente verticale de la tour, qui se dirige (à environ 15 m au-dessus du sol) vers le shunt de mesure. Afin qu'aucun courant ne puisse s'écouler au sol par les ancrages des haubans, ceux-ci sont interrompus chacun par une poutre de bois de 12 m de long (fig. 2), elle-même protégée d'une destruction par un éclateur réglé actuellement à 3 m de distance disruptive. La figure 3 montre une vue perspective de la tour depuis le sol.

Le *dispositif de mesure du courant de foudre* est logé dans un vieux bâtiment inoccupé, qui a été aménagé en conséquence. Au printemps 1943, aucun oscillographe cathodique n'était disponible, aussi fut-on obligé de modifier un oscillographe à boucles obligeamment prêté par l'Institut de technique de la haute fréquence de l'EPF, que dirige M. le professeur F. Tank, et de mettre au point les accessoires nécessaires. Cette disposition ne permettait naturellement pas d'enregistrer la variation d'un courant de choc d'une durée inférieure à $\frac{1}{1000}$ s, car les boucles de mesure ont une inertie beaucoup trop grande pour cela. L'oscillographe à boucles permet par contre d'enregistrer des courants de foudre de *longue durée* qui font parfois suite au choc initial et durant quelques millièmes, voire même quelques centièmes ou dixièmes de seconde. Cette durée exceptionnellement longue est probable-

ment la cause des incendies provoqués par la foudre. On a tenté d'enregistrer à l'aide de l'oscillographe à boucles la valeur de crête et la charge *du choc* de courant de foudre. On y est parvenu en chargeant des condensateurs par des valves à cathode incandescente, d'une part avec la chute de potentiel au shunt du courant de foudre et, d'autre part par l'intermédiaire d'une résistance ohmique qui rend le courant de charge proportionnel à la chute de potentiel. Dans le premier cas, la tension de charge du condensateur est proportionnelle à la chute maximum de potentiel du courant de foudre dans le shunt, c'est-à-dire proportionnelle à la *valeur de crête* du courant de foudre. Dans le second cas, la charge du condensateur est proportionnelle à la *charge* d'un choc de courant de foudre.

Fig. 2.

Vue partielle de la tour paratonnerre et des haubans isolants

Ces condensateurs sont chargés avec une extrême rapidité par la foudre. Ils se déchargent ensuite par les boucles de mesure de l'oscillographe et par des résistances appropriées, à une allure suffisamment réduite pour que les boucles de mesure puissent

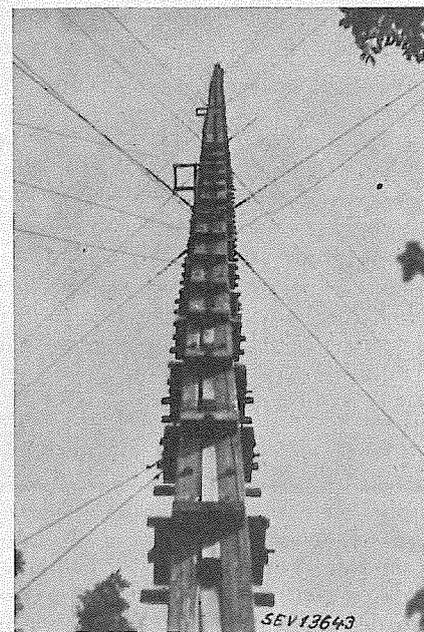


Fig. 3.

Tour paratonnerre, vue en perspective depuis le sol

suivre le processus malgré leur inertie mécanique et indiquer par leur déviation initiale la valeur de la grandeur en question.

Afin d'éviter tout retard dans le fonctionnement de l'oscillographe à boucles à l'apparition de la

foudre, l'obturateur reste ouvert au-dessus du film en rotation, et c'est la foudre qui enclenche elle-même la source d'éclairage de l'oscillographe, qui consiste simplement en une lampe à arc avec électrodes de tungstène. L'arc est allumé par une surtension produite par un petit générateur de chocs à 12 000 V, mis en marche par le courant de foudre. Après la décharge des condensateurs, un courant continu s'écoule d'une batterie qui est déclenchée au bout d'une seconde par un relais temporisé. On arrive ainsi à obtenir une lumière à arc très intense durant le premier millième de seconde, et à enregistrer par conséquent la première partie de la décharge de la foudre, qui est généralement la partie la plus importante. La figure 4 montre le dispositif de mesure de 1943, comprenant une batterie, un groupe convertisseur, un redresseur de charge et un oscillographe, le tout entouré d'une cage de Faraday. Cette cage, qui est nécessaire pour assurer la protection de l'observateur, est à quelques 100 kV contre la terre au moment du coup de foudre, par suite des chutes de potentiel inductives du courant de foudre dans la ligne de terre.

Le shunt pour la mesure du courant de foudre obligea à résoudre plusieurs problèmes fort délicats, car les variations du courant de foudre sont extraordinairement rapides et peuvent atteindre quelques $10\,000\text{ A}/\mu\text{s}^4$. Contrairement à la disposition utilisée à l'Empire State Building, on a prévu au Monte San Salvatore un shunt à trois étages en résistances métalliques précises (constantan et cumal). Les résistances de mesure des trois étages sont respectivement de 0,02, 0,5 et 10 ohms. Elles sont constituées par des tubes à très faible inductance,

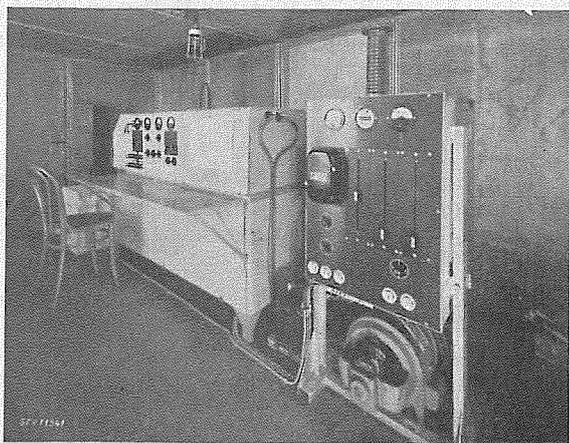


Fig. 4.

Intérieur de la cage de Faraday, en 1943

Au fond, la batterie. Au premier plan, le groupe convertisseur avec régulateur. Au centre, l'oscillographe enregistreur spécial (fermé, prêt à fonctionner)

selon un principe appliqué avec succès depuis plusieurs années. Les deux premiers étages doivent être protégés contre les surcharges, ce qui s'obtient en utilisant des résistances variables, analogues à celles dont on se sert dans la construction des parafoudres. En raison des densités de courant élevées et de la longue durée des courants, ces résistances en céramique donnent toutefois lieu à d'importantes boucles

d'hystérésis, de sorte que leur valeur est fort douteuse pour des mesures directes. Si l'on tient à éviter d'importantes erreurs de mesure, il ne faut utiliser ces résistances qu'avec précaution pour la protection de résistances constantes de valeur ohmique élevée.

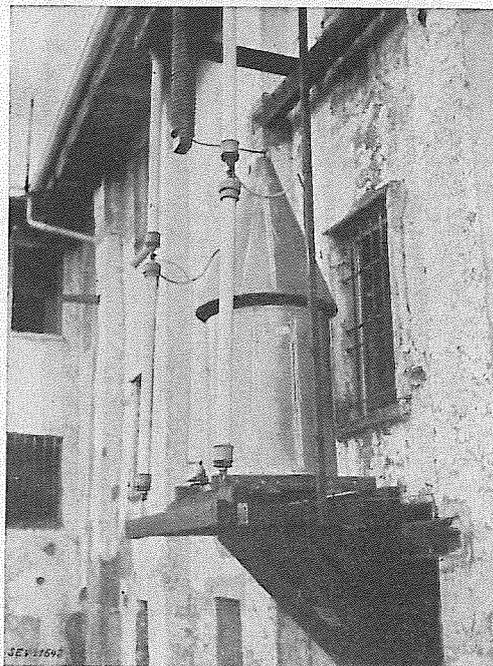


Fig. 5.

Shunt de mesure du courant de foudre

Sous les calottes en tôle servant à les protéger de la pluie se trouvent les shunts pour les trois échelles de courant. En haut, la bobine pour la mesure de la raideur du courant, avec 4 résistances tubulaires non inductives pour deux étendues de mesure

Le dispositif de mesure est complété par des barreaux d'acier pour la mesure de la valeur de crête du courant de foudre, utilisés depuis plusieurs années sur des pylônes de lignes à haute tension³⁾ et par des boucles d'induction pour la mesure de la raideur maximum du courant de foudre⁴⁾. Dans ce même but, deux pointes klydonographiques sont disposées directement au-dessus du tambour d'enregistrement portant le film photographique. Ces pointes mesurent avec des sensibilités différentes la chute de potentiel dans une bobine de self dans l'air d'environ $12\ \mu\text{H}$, parcouru par le courant de foudre en série avec le shunt. Ces derniers dispositifs sont montés en plein air, contre le mur du bâtiment (fig. 5).

La disposition qui vient d'être décrite fut mise en service en juin 1943. L'année suivante, elle fut complétée par un premier oscillographe cathodique, puis au printemps 1945 par un deuxième.

La figure 6 montre l'intérieur de la cage de Faraday, tel qu'il se présentait en 1944 avec le premier oscillographe cathodique; sur la figure 7, on aperçoit les deux oscillographes de 1945. Les oscillographes

³⁾ Grünwald: CIGRE 1937, no. 316, et 1936, no. 323. — Matthias, A.: Bisherige Ergebnisse der Gewitterforschung der Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen e. V. Elektr.-Wirtsch. t. 26(1927), no. 424, p. 2...9.

⁴⁾ Berger, K.: Resultats des mesures effectuées au cours des orages de 1934/35. Bull. ASE t. 27(1936), no. 6, p. 145...163.

sont montés avec leur source de tension cathodique sur un pupitre en fer, qui renferme également les accessoires (pompes, redresseurs auxiliaires, dispositifs de couplage). Le «relais de balayage», visible

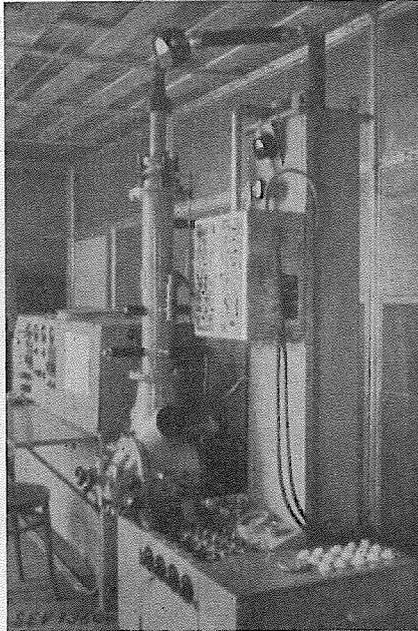


Fig. 6.
Intérieur de la cage de Faraday, en 1944
avec un oscillographe cathodique avec sas pour film, source
de tension cathodique à 50 kV et relais de balayage universel

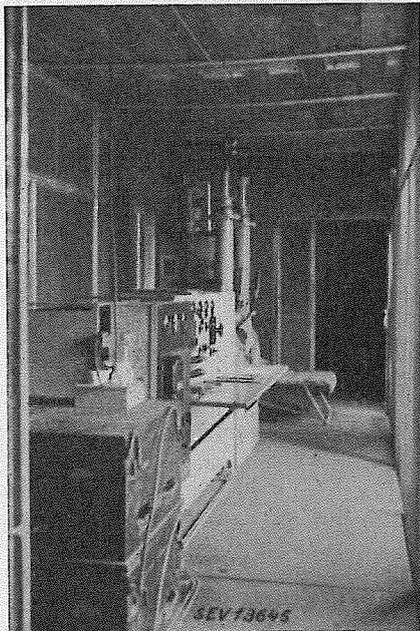


Fig. 7.
Intérieur de la cage de Faraday, en 1945
avec deux oscillographes cathodiques à l'arrière-plan

sur la figure 6, est fixé entre les deux oscillographes à la source de tension. Il s'agit d'un couplage pour une ou plusieurs déviations logarithmiques ou linéaires du rayon cathodique au moment voulu le long de l'axe des temps des oscillogrammes. L'un des os-

cillographes enregistre pendant une durée de l'ordre de 10^{-4} s, l'autre pendant 10^{-2} s environ. L'oscillographe enregistreur à boucles complète la série avec 1 s environ. Les oscillographes cathodiques sont mis en service, c'est-à-dire débloqués, par le courant de foudre, de la manière habituelle, par l'intermédiaire d'un éclateur double⁵⁾.

Les résultats d'essai 1943...1945

Au cours des trois années 1943 à 1945, on a observé 7 à 10 coups de foudre par an sur la tour paratonnerre. Quelques oscillogrammes typiques du courant de foudre sont reproduits ci-après.

Il s'agit tout d'abord d'enregistrements obtenus avec l'oscillographe à boucles (fig. 8 à 12), dont les 6 boucles furent utilisées comme suit:

- 1^{re} boucle pour la mesure de la charge positive du courant de foudre ($+q$) dans chaque choc;
- 2^{me} boucle pour la mesure de la valeur de crête positive du courant de foudre ($+i_{max}$) de 2000 à 100 000 A;
- 3^{me} boucle pour la mesure de la queue de longue durée du courant de foudre dans l'intervalle de 1 à 50 A;
- 4^{me} boucle pour la mesure de la queue de longue durée du courant de foudre dans l'intervalle de 50 à 2000 A;
- 5^{me} boucle pour la mesure de la valeur de crête négative du courant de foudre ($-i_{max}$) de 2000 à 100 000 A;
- 6^{me} boucle pour la mesure de la charge négative du courant de foudre ($-q$) dans chaque choc.

Les courbes de courant mesurées directement au shunt se trouvent au centre des oscillogrammes des figures 8 et 12 et sont désignées par ± 50 A et ± 2000 A. Il s'est parfois produit aux résistances de protection du shunt des contournements ou des perforations, de sorte que l'une des deux étendues de mesure directe n'indiquait plus à l'échelle exacte (par exemple échelle ± 50 A sur la figure 12). Au-dessus et au-dessous de ces deux courbes ± 50 A et ± 2000 A sont enregistrées les charges de choc ($+q$) et ($-q$) mesurées à l'aide du couplage artificiel qui vient d'être décrit, ainsi que les valeurs de crête du courant de choc ($+i_{max}$) et ($-i_{max}$). Ces valeurs ont été mesurées au shunt de 0,02 ohm non protégé; elles ne sont donc pas influencées par des avaries qui auraient pu survenir à des résistances de protection des étages de 0,5 et 10 ohms.

La figure 8 indique trois exemples de courants de très brève durée (a, b, c). Sur la figure 8a, on peut observer non seulement les enregistrements dans l'étendue de 50 A et 2000 A, mais aussi deux charges de choc d'environ $-0,4$ et $-0,2$ C, qui suivent à environ 0,03 s. La boucle de mesure de (i_{max}) n'a malheureusement pas fonctionné à cette occasion. Sur les figures 8b et 8c, on constate également trois chocs à des intervalles analogues, tandis que la boucle de mesure de (i_{max}) indique des valeurs de crête jusqu'à -20 kA environ.

La figure 9 montre un cas contraire à celui de la figure 8, c'est-à-dire deux courants de très longue durée (d'environ 0,54 et 0,62 s). Dans le premier exemple, un choc de courant n'apparaît que 0,35 s après le début de l'oscillogramme (environ -19 kA).

⁵⁾ Berger, K.: Eine neue Schaltung für die Erzeugung zeitproportionaler Ablenkungen in Kathodenstrahl-Oszillographen. Bull. ASE t. 35(1944), no. 2, p. 33...40.

Il est suivi de 2 autres chocs, dont la mesure est toutefois incertaine.

Dans le deuxième exemple, le courant commence avec un choc de 30 kA, s'écoule ensuite pendant 0,5 s avec une intensité d'environ 100 A et l'on observe après 0,43 à 0,52 s quatre courants de choc

déterminée d'après la courbe des i , car la boucle destinée à la mesure de chocs de courant n'est pas assez précise pour les courants de faible intensité. Dans le premier exemple, il s'agit d'environ 30 C et, dans le second, d'environ 60 C.

Au cours de l'orage de la nuit du 4 août 1944, qui a donné lieu par exemple au premier oscillogramme de la figure 9, M. P. Stern, un jeune ingénieur participant aux mesures, a photographié depuis Lugano-Cassarate un coup de foudre direct sur la tour du Monte San Salvatore (fig. 10). Tout l'espace entourant la tour paratonnerre semble être illuminé par l'éclair, ce qui provient probablement de l'effet couronne des haubans.

La figure 11 illustre un cas intéressant de courants de grandeur et de durée moyennes. Durant l'orage du 22 mai 1945, il se produisit 4 coups de foudre directs en 30 minutes. Trois d'entre eux ont

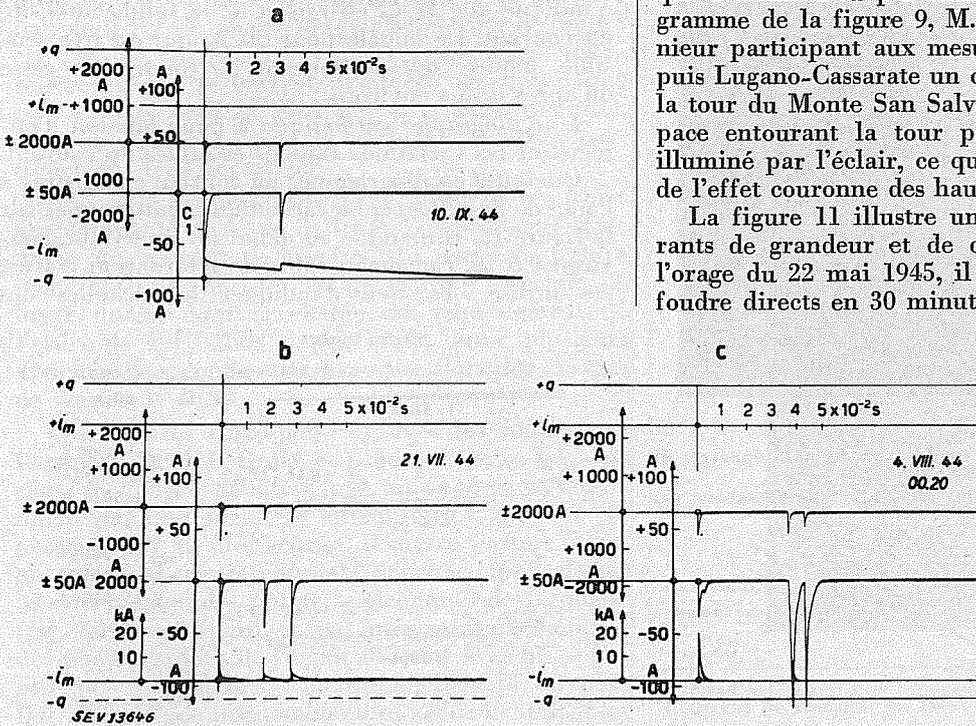


Fig. 8.

Trois oscillogrammes de courant de foudre de brève durée avec 2 ou 3 coups de foudre partiels chacun

superposés de 27, 30, 22 et 26 kA. Le troisième de ces chocs a eu lieu juste au moment où le courant de foudre passait pour la première fois par zéro, tandis que le quatrième choc se présenta après un intervalle sans courant de 0,02 s. Pour cet oscillo-

la même allure que ceux de la figure 11, tandis que le quatrième a suivi un chemin imprévu, dont il est fait mention plus loin. Ces courants se distinguent par leur grandeur moyenne (environ 7 kA dans l'exemple), leur intensité atteignant toutefois quel-

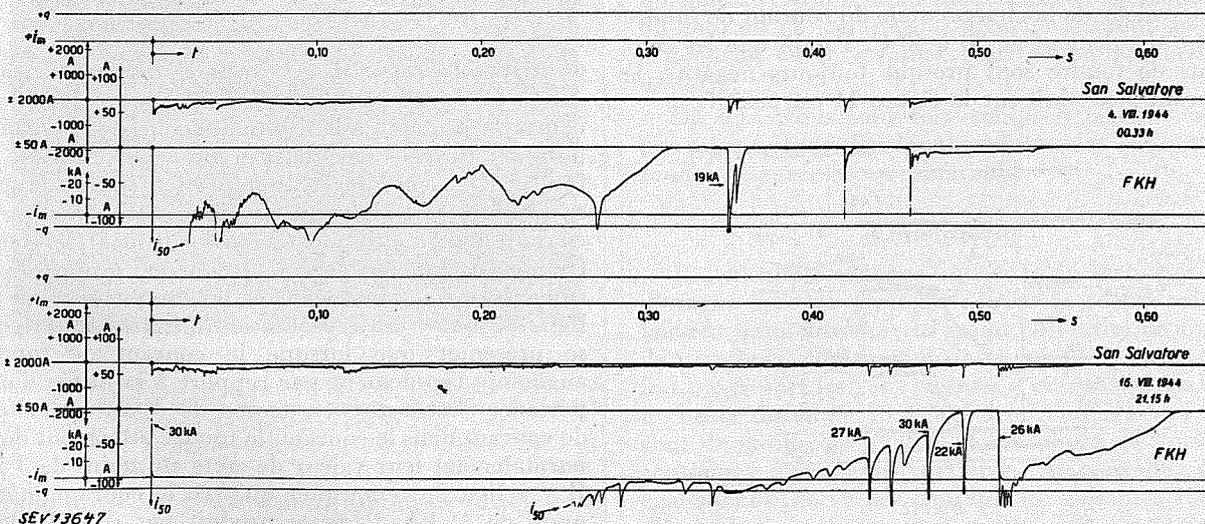


Fig. 9.

Deux oscillogrammes de courant de foudre de faible intensité et de longue durée avec courant de choc superposés

gramme de la figure 9, la boucle de mesure de la charge du choc n'a malheureusement pas fonctionné. La charge des courants de longue durée peut être

mesurée à l'aide de la courbe des i , car la boucle destinée à la mesure de chocs de courant n'est pas assez précise pour les courants de faible intensité. La charge (+ q) indiquée totale est de 29 C environ. L'allure en gradins de la courbe

de q provient des différentes pointes de courant et de la caractéristique des valves utilisées dans le couplage artificiel. Ainsi qu'on l'a déjà fait observer, la boucle (q) indique pour les faibles courants de foudre des valeurs trop basses, de sorte que la

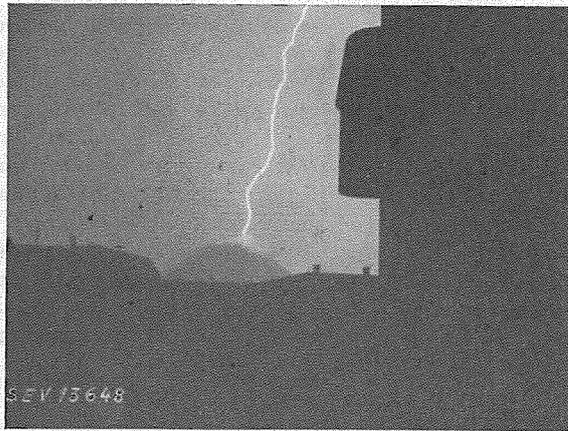


Fig. 10.

Photographie d'un coup de foudre sur le paratonnerre du Monte San Salvatore prise le 4 août 1944, à 00 h 38 m, depuis Lugano-Cassarate, par M. P. Stern

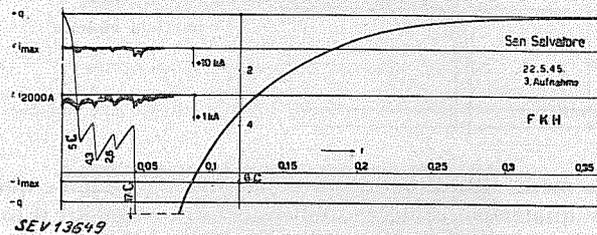


Fig. 11.

Oscillogramme d'un courant de foudre de grandeur et durée moyenne

vraie valeur de la charge totale du courant de foudre est probablement de 30 à 40 C. Tandis que les courants de foudre sont presque toujours négatifs, le courant reproduit sur la figure 11 est positif.

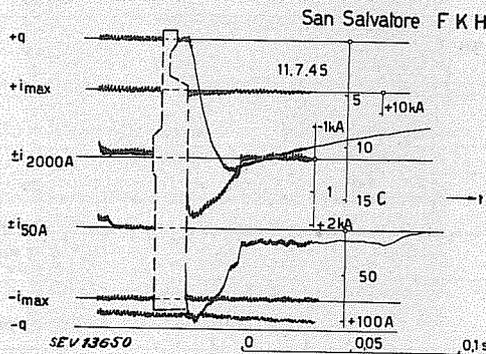


Fig. 12.

Oscillogramme d'un courant de foudre avec une décharge partielle négative et une décharge positive

La figure 12 est un exemple du cas très rare où le même coup de foudre présente tout d'abord un courant négatif, puis un courant positif. Le commencement de l'enregistrement paraît avoir été un

peu retardé en raison de la faible valeur du courant, car on ne constate pas de montée de la courbe de ($-q$). Après un voile indiqué par des traits fins, il s'établit un courant positif d'une valeur de crête d'environ 2 kA, durant 0,03 s. La charge ($+q$) est d'environ 24 C d'après la mesure de la courbe de i . La boucle de ($+q$) servant à la mesure du choc n'indique que 12 C, en raison de la faible intensité du courant. La boucle pour 50 A, qui est très sensible, montre que le courant de foudre n'a cessé qu'après 0,15 s environ.

L'oscillographe cathodique a pour mission d'enregistrer les variations rapides et raides du courant.

Quelques oscillogrammes du courant enregistrés à l'aide de l'oscillographe cathodique sont groupés sur la figure 13. Il manque au début un intervalle d'environ $0,5 \mu s$, car aucun câble de retardation n'avait été utilisé. Au lieu d'indiquer les échelles des

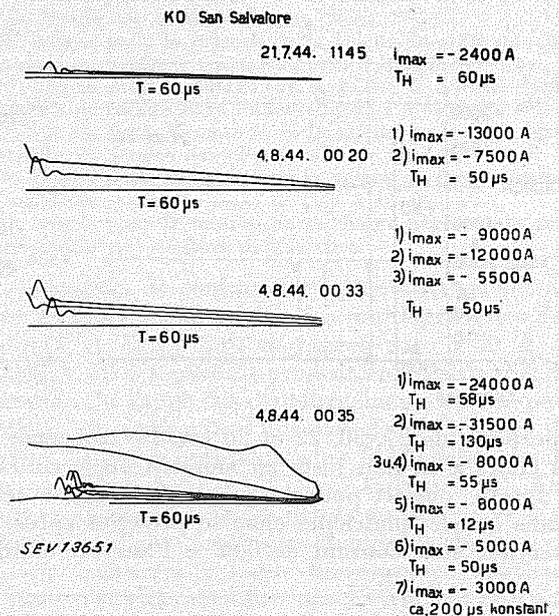


Fig. 13.

Oscillogrammes cathodiques de chocs de courant de foudre

courbes, on a noté à la droite des courbes les valeurs déjà déterminées des oscillogrammes du courant de foudre. On remarquera tout particulièrement qu'il se produit généralement au début des courbes de courant une oscillation d'environ 0,33 MHz. Cette fréquence coïncide avec la fréquence propre de la capacité du paratonnerre et de l'inductance de la ligne de terre. Cette oscillation du système ne peut se présenter que lorsque le courant de foudre augmente rapidement par rapport à la durée d'une période, c'est-à-dire en moins de $3 \mu s$. Les chocs de courant dans le courant de foudre atteignent donc normalement leur valeur de crête en moins de $3 \mu s$. Il y a lieu de remarquer qu'avec le courant maximum de 31 kA, il ne se produit pas d'oscillation. Le déblocage de l'oscillographe s'est opéré dans ce cas un peu tardivement, de sorte que le début n'est pas visible sur l'oscillogramme. Outre les valeurs de courant, les formes du courant sont très remarquables. La courbe du courant se rapproche très souvent d'une ligne exponentielle avec une durée

de mi-amplitude T_H de 12 à 130 μ s. La durée maximum du courant $T_H = 130 \mu$ s coïncide avec le courant d'intensité maximum de 31 500 A. La forme des deux plus grands courants n'est pas uniformément exponentielle.

La concordance entre les mesures oscillographiques du courant et les valeurs mesurées à l'aide des barreaux d'acier magnétisés par le courant de foudre est dans de nombreux cas très bonne. Il faut naturellement que le barreau n'ait été magnétisé que par un seul courant de choc de grande intensité, sinon la mesure à l'aide de ces barreaux serait pratiquement trop incertaine.

Les oscillogrammes enregistrés jusqu'ici montrent une étonnante diversité de forme, de grandeur et de durée du courant de foudre. Un coup de foudre peut en effet consister en un courant de choc de brève durée, dont la charge est généralement de l'ordre de 1 C. Mais il peut aussi durer plusieurs dixièmes de seconde et transporter alors des charges de l'ordre de 30 C.

Ces mesures correspondent avec les indications fournies par MM. Bruce et Golde⁶⁾. Outre les courants de foudre débutant par un choc et se continuant par une queue de longue durée, qui ont été observés par M. McEachron, il arrive parfois qu'un ou même plusieurs courants de choc apparaissent brusquement à des points quelconques de la queue (fig. 9). A cet égard, il est intéressant d'examiner des photographies de l'éclair obtenus avec un appareil qui a été déplacé intentionnellement ou non. Des traces de ce phénomène sont réellement visibles sur certaines de ces photographies. La figure 14 reproduit une photographie prise par le professeur Mercanton, ancien directeur de l'Office météorolo-

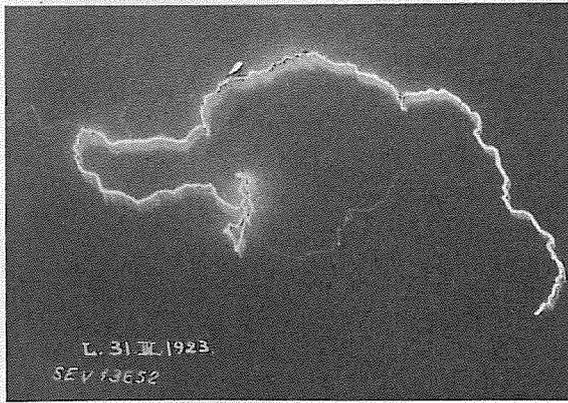


Fig. 14.

Photographie d'un éclair au-dessus de Lausanne avec un courant de longue durée et une brusque intensification (maximum de courant) vers la fin prise par le professeur Mercanton, le 13 mars 1923

gique suisse, au cours d'un orage au-dessus de Lausanne, le 31 mars 1923. Sur l'original, on peut nettement reconnaître des traits plus clairs dans le voile produit par le déplacement de l'appareil photographique et par des chocs superposés de courant.

⁶⁾ Bruce, C. E. R., et Golde, R. H.: The lightning discharge. J. Inst. Electr. Engrs., Part II, t 88(1941), no. 6, p. 487...520.

La figure 15 montre, pour terminer, un effet inattendu d'un coup de foudre. Au cours de l'orage du 22 mai 1945, une connexion d'un objet d'essai, inséré dans la ligne reliant le paratonnerre au shunt adossé au mur du bâtiment, se dégagea. L'extrémité du fil fut projetée contre le mur, sous l'effet des



Fig. 15.

Effet d'explosion d'un courant de foudre dans le mur du bâtiment de mesures du Monte San Salvatore, le 22 mai 1945

forces électrodynamiques du courant du premier coup de foudre. Au cours de la décharge suivante, qui eut lieu quelques minutes plus tard, le courant de foudre prit alors un chemin imprévu en traversant le mur et en suivant une ligne de terre qu'il rencontra. L'illustration montre l'effet d'éclatement du courant de foudre, qui arracha le crépi du mur à l'endroit où il le quitta pour passer par la ligne de terre.

De tels effets sont fort compréhensibles, car le pouvoir explosif d'ordre thermique des courants de foudre mesurés est considérable.

Conclusions

Les résultats obtenus au cours de trois périodes d'orages avec environ 30 coups de foudre directs laissent déjà entrevoir la grande diversité de forme, de grandeur, de durée et de charge des courants de foudre. A part les cas extrêmes d'un courant de choc de brève durée de 10 à 50 kA et d'un «faible» courant de moins de 1000 A, d'une durée de quelques centièmes à quelques dixièmes de seconde, on a également observé des courants de quelques 1000 A d'une durée atteignant à peine 0,01 s. Ces trois formes peuvent se superposer. La raideur des courants de choc du courant de foudre est considérable; la durée de front est très souvent inférieure à 3 μ s. La durée de mi-amplitude des courants de choc de plus de 5000 A est généralement de 50 à 130 μ s selon les observations faites, mais les mesures sont encore

trop peu nombreuses à cet égard, pour pouvoir en tirer des conclusions générales.

Il faut espérer qu'en poursuivant les mesures et en perfectionnant sans cesse les dispositifs de mesure,

on arrivera à se faire une idée claire et complète des propriétés de la foudre.

Adresse de l'auteur:

Dr. K. Berger, Versuchingenieur der FKH, Seefeldstrasse 301, Zürich 8.

Moderne Modulations-Systeme

Vortrag, gehalten an der 9. Hochfrequenztagung des SEV vom 27. September 1945 in Yverdon,
von P. Güttinger, Baden

621.396.619.1

Die Entwicklung der Hochfrequenz-Technik auf dem Gebiete der kürzesten Wellen hat in verschiedener Hinsicht ganz neue Möglichkeiten eröffnet. So werden auch Modulationsarten aktuell, welche breite Frequenzbänder beanspruchen: Die Frequenz- und die Zeitmodulation. Mit diesen neuen Modulationsverfahren ist es möglich, die Störeinflüsse weitgehend zu eliminieren. Ausser den beiden erwähnten Verfahren sind noch zahlreiche kombinierte Modulationsarten möglich, wie dies in einer Uebersicht gezeigt wird.

Le développement de la technique de l'haute fréquence dans le domaine des ondes les plus courtes a ouvert des perspectives d'application tout à fait nouvelles et diverses. Ainsi des procédés de modulation exigeant une large bande de fréquence, tels que la modulation de fréquence et la modulation de temps, deviennent actuels. Ces nouveaux procédés de modulation ont l'avantage d'éliminer les effets des perturbations dans de grandes limites. De nombreux autres systèmes combinés de modulation sont mentionnés.

Eine rein harmonische Sinuswelle gleicht gewissermassen einem unbehauenen Stein. Beide sind nicht imstande, uns eine Aeusserung, eine Mitteilung anderer Menschen zu vermitteln. Um mit Hilfe hochfrequenter Wellen Nachrichten, Musik oder Bilder zu übertragen, müssen wir die Schwingungen entsprechend den Variationen der Ton- oder Bildspannung verändern. Diese zeitliche Veränderung der elektrischen Schwingungen bezeichnet man als *Modulation*.

Eine Gruppe frequenzbenachbarter Wellen (Fig. 1), die bei einer modulierten Uebertragung auftreten, lässt sich mathematisch durch den Ausdruck

$$A(t) \sin \{\Omega_0 t + \Psi(t)\}$$

darstellen. Die Funktion $A(t)$ bezeichnet man als *Amplitude*. Ω_0 ist die *Trägerfrequenz* (Kreisfrequenz) der Wellengruppe und wird als zeitlich konstant vorausgesetzt. $\Psi(t)$ nennt man die *Phase*, welche ihrerseits eine Funktion der Zeit sein kann.

Unsere Nachricht können wir nun in der Weise übertragen, dass wir entweder die Amplituden- oder die Phasenfunktion in eine Beziehung zur ursprünglichen Tonspannung bringen. So erhalten wir zunächst zwei *direkte Modulationsarten*: Die *Amplituden-* und die *Phasenmodulation*.

Die Amplitudenmodulation (AM) wird durch die zeitliche Variation der Funktion $A(t)$ dargestellt. Bei der Phasenmodulation steht die modulierende Spannung in linearer Proportion zur Phasenfunktion $\Psi(t)$.

Jeder Frequenzgruppe, die in Fig. 1 dargestellt ist, lässt sich ausser der Phasenmodulation auch eine

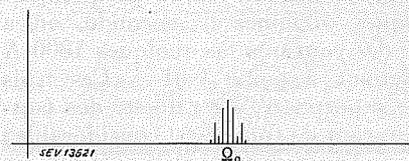


Fig. 1.

Frequenz-Gruppe

Frequenzmodulation zuordnen. Die «Momentanfrequenz» der Wellengruppe ist durch die zeitliche Ableitung des Sinusarguments, d. h. durch

$$\frac{d}{dt} \{\Omega_0 t + \Psi(t)\} = \Omega_0 + \frac{d\Psi}{dt}$$

gegeben. Bei Frequenzmodulation ist daher die Ton- oder Bildspannung der Grösse $\frac{d\Psi}{dt}$ proportional.

Neben diesen sogenannten direkten werden auch *indirekte Modulationsarten* verwendet, bei denen die Niederfrequenz-Spannung vor dem Modulationsprozess einer nichtlinearen Umwandlung unterworfen wird. Dazu gehören beispielsweise alle möglichen Arten der Impulsmodulation, im speziellen auch die Zeitmodulation. Diese besteht darin, dass die Ton- oder Bildspannung zuerst in breite- oder lagemodierte Impulse konstanter Amplitude umgewandelt wird, welche dann zur Tastung der hochfrequenten Amplitude oder Frequenz verwendet werden.

Von den unzähligen Modulationsmöglichkeiten sollen im Rahmen dieses Referates nur zwei der bekanntesten näher besprochen werden: *Die Frequenzmodulation* (FM) und *die Zeitmodulation* (ZM).

Die Frequenzmodulation

Es ist eigentlich merkwürdig, dass die grossen Vorteile der FM erst verhältnismässig spät erkannt wurden und ihre praktische Verwertung fanden. Der Hauptgrund ist, dass die Ultrakurzwellen-Technik eine Entwicklung neueren Datums ist. Daneben darf aber auch ein rein psychologischer Grund nicht übersehen werden: Die FM war bei AM-Sendungen eine meist unerwünschte Erscheinung, welche man dort mit allen Mitteln unterdrücken musste.

Nachdem besonders in der amerikanischen Literatur jahrelang über die Brauchbarkeit der FM hin und her diskutiert wurde, gelang es 1935 Prof. *Armstrong* nach anfänglich grossen Schwierigkeiten, die bedeutenden Vorteile dieser Modulationsart, besonders hinsichtlich Störfreiheit, eindeutig nachzuweisen. Seither hat die FM-Technik und neustens auch der FM-Rundfunk in Amerika einen grossen Aufschwung genommen. Später haben sich auch vereinzelte europäische Firmen und Verwaltungen dafür interessiert. Wir haben uns schon vor dem Krieg mit der FM-Forschung beschäftigt und konnten un-