

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 24 (1933)
Heft: 15

Artikel: Un générateur de chocs à câbles de grande puissance pour une tension de choc d'un million de volts
Autor: Berger, K. / Schneeberger, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057245>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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 :

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A., Zurich 4
Stauffacherquai 36/38

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

XXIV^e Année

N^o 15

Vendredi, 21 juillet 1933

Un générateur de chocs à câbles de grande puissance pour une tension de choc d'un million de volts

Rapport présenté à la Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension 1933 à Paris, par K. Berger, ingénieur de l'ASE, Zurich, et E. Schneeberger, ingénieur de la Fabrique de Câbles de Brougg S. A., Brougg.

621.313.12 : 621.316.313 : 621.3.015

Les auteurs décrivent une installation génératrice de chocs, destinée aux recherches sur les surtensions entreprises par l'Association Suisse des Electriciens. Cette installation se distingue de celles en usage jusqu'ici par le fait qu'au lieu d'une grande quantité d'échelons en série, composés de condensateurs individuels, de résistances et d'éclateurs, elle consiste simplement en quelques échelons composés de câbles spéciaux pour haute tension continue, en couplage Marx. Pour l'essai de choc des lignes aériennes, cette disposition peut être, en outre, avantageuse pour les installations nécessitant une forte énergie de choc, car on peut la monter sans difficulté en plein air, et les quelques échelons nécessaires (bobines de câbles) sont d'un transport et d'un montage relativement aisés.

Die Autoren beschreiben eine für die Ueberspannungsuntersuchungen des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins ausgeführte Stoßspannungsanlage, die sich von den bisher gebräuchlichen dadurch unterscheidet, dass an Stelle einer Riesennmenge von seriegeschalteten Stufen aus Einzelkondensatoren, Widerständen und Funkenstrecken nur wenige Stufen mit Spezialkabeln für hohe Gleichspannung in Marx-Schaltung verwendet werden. Zum Anstossen von Freileitungen hat sich diese Anordnung der bisher gewohnten Schaltung aus sehr vielen Stufen mit konzentrierten Kapazitäten als elektrisch ebenbürtig erwiesen, was mit Kathodenstrahl-Oszillogrammen nachgewiesen wird. Sie hat überdies für Anlagen mit grosser Stossenergie unter Umständen Vorteile, da z. B. Freiluftaufstellung ohne weiteres möglich ist und die wenigen Stufen (Kabelrollen) relativ einfach zu transportieren und aufzustellen sind.

Le développement rapide dans la construction et le service des lignes à haute tension, dont les tensions nominales augmentent sans cesse et dont on exige une sécurité de service de plus en plus grande, nécessite une connaissance parfaite des surtensions réelles et des moyens de les éviter ou de les rendre inoffensives.

Ce n'est qu'au cours de ces dernières années que les clydonographes et les oscillographes cathodiques transportables ont permis des recherches dans les sections menacées des réseaux. On a pu réaliser ainsi d'étonnants progrès dans la connaissance de l'importance, de la fréquence et de l'allure des surtensions dans les installations électriques. Ceci a permis de jeter des bases sûres pour la construction et l'essai d'appareils de protection réellement efficaces. Toutefois, ce serait une entreprise extrêmement dispendieuse et absorbante que de vouloir essayer ces appareils de protection à l'aide de surtensions naturelles. Aussi a-t-on construit depuis longtemps des générateurs, dits de chocs, qui permettent d'imiter les surtensions telles qu'elles se produisent dans les réseaux. Pour les recherches relatives aux orages, il était donc nécessaire, en Suisse également, de monter une installation d'essais comportant un générateur de chocs. Cette installation doit permettre d'imiter parfaitement les surtensions provoquées par la foudre et de soumettre les appareils de protection aux mêmes

contraintes que celles qui se produisent lors de décharges atmosphériques.

L'étude des orages a montré qu'il est possible de les imiter, si l'on dispose de générateurs de chocs appropriés.

Jusqu'ici, les générateurs de chocs ont toujours comporté un très grand nombre de condensateurs, branchés en parallèle et en série, afin d'obtenir la capacité et la tension nécessaires. Le couplage utilisé est, presque sans exception, celui de Marx.

Les auteurs ont suivi un autre chemin, en utilisant des câbles à haute tension au lieu de batteries de condensateurs. Pour les installations de ce genre, ce système peut offrir, dans certains cas, des avantages très sensibles. La fig. 1 représente le schéma d'un tel générateur de chocs à câbles, et la fig. 2 une vue d'une installation de ce genre. Le générateur comporte trois câbles spéciaux, montés selon le couplage de Marx, chacun pour une tension continue de 350 kV.

La construction de ces câbles ne diffère pas sensiblement de celle des câbles normaux pour haute tension. A vrai dire, il a fallu tenir compte de certains détails nécessités par le genre d'utilisation de ces câbles.

Il s'agissait, avant tout, de réaliser une capacité aussi grande que possible, sans trop réduire la résistance aux perforations. En outre, il ne fallait pas

que les câbles deviennent trop lourds, afin qu'un déplacement de l'installation soit possible par des moyens normaux. La construction que nous avons

tensions continues, où la résistance de l'isolement a une grande importance, les faibles pertes ohmiques de la ligne dans le diélectrique contribuent à la

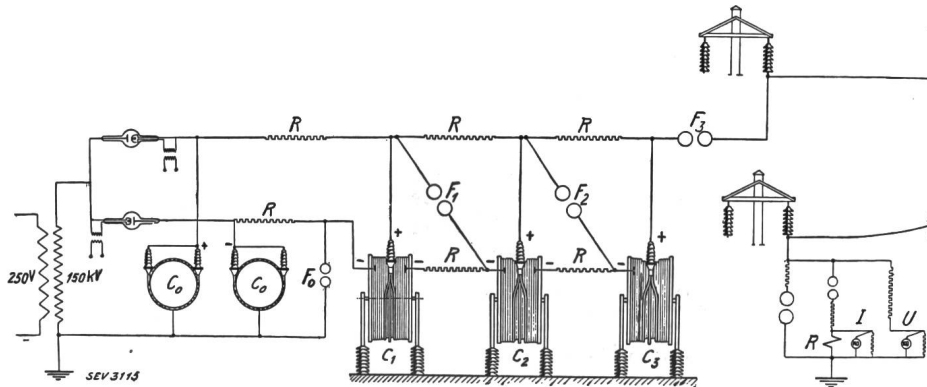


Fig. 1. Schéma de couplage de l'installation génératrice de chocs.

adoptée est celle de la fig. 3. Pour augmenter la capacité, nous avons choisi une section artificiellement accrue de 300 mm² ($r = 11,25$ mm). L'isolement, composé d'environ 120 couches de papier de

sécurité de fonctionnement du câble. La perte de courant, mesurée sous une tension continue de 150 kV, n'a atteint qu'environ 0,017 mA pour une longueur de 370 m.

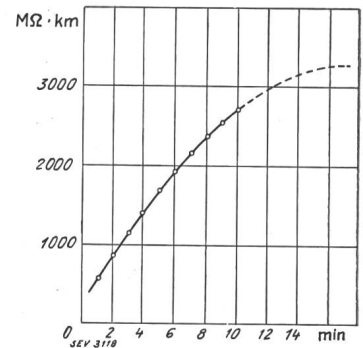


Fig. 4. Mesure de l'isolement du câble.

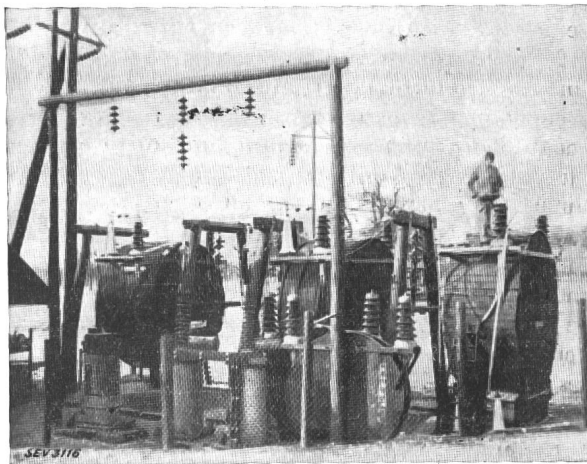


Fig. 2. Vue du générateur de chocs à câbles.

L'imprégnation, un peu différente de celle des câbles normaux pour courant alternatif, a exigé un traitement particulièrement soigné de ces câbles pendant leur imprégnation. Grâce à diverses méthodes de contrôle, il a été possible de maintenir les pertes diélectriques à la même valeur que pour les câbles normaux à très haute tension (voir fig. 5). Les essais de claquage en fonction de la durée effectués sur quelques tronçons de 10 m avec du courant alternatif à 50 pér./s, ont donné les valeurs suivantes (fig. 6):

N° 1	220 kV:	1 h 53'	corresp. 31,8 kV _{eff} /mm
» 2	180 kV:	10 h 30'	» 26,1 »
» 3	150 kV:	38 h 27'	» 21,8 »
» 4	140 kV:	112 h 14'	» 20,3 »

densités différentes, présente une épaisseur de 9,6 mm ($R = 20,85$ mm). La capacité ainsi obtenue atteint 0,33 μF/km, ce qui correspond à une constante diélectrique $\epsilon = 3,65$. Cette constante est, d'une part, nécessaire pour augmenter la capacité du câble et, d'autre part, avantageuse par les valeurs élevées de l'isolement ainsi obtenues (voir fig. 4). Ces câbles étant surtout utilisés pour les

Selon les essais de M. Weiset¹⁾ et d'après nos propres résultats sur des tronçons de câbles présentant un isolement plus mince, on peut tabler sur un rapport des tensions de perforation de 1 : 2,5 entre tension alternative efficace et tension continue, ceci pour une contrainte de très longue durée. Il s'ensuit que les câbles utilisés supportent sans difficulté une contrainte sous une tension continue

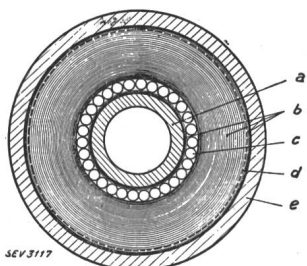


Fig. 3. Section du câble à courant continu pour 350 kV.
 b Couches de papier imprégné.
 a Tube intérieur en plomb.
 c Ame en cuivre.
 d Feuille d'étain.
 e Tube extérieur en plomb.

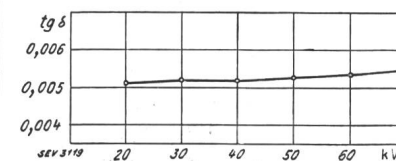


Fig. 5. Facteur de pertes diélectriques du câble, mesuré à 50 pér./s.

¹⁾ ETZ 1920, p. 48 et 71.

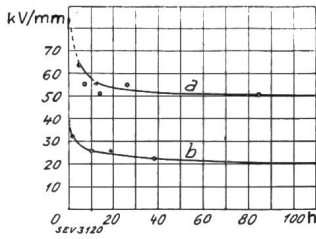


Fig. 6.
Relation entre la tension de perforation du câble et la durée d'application de la tension,
a sous tension continue,
b sous tension alternative de 50 pér./s. (valeurs eff.).

de 350 kV telle qu'elle se produit lors de la pleine charge, d'autant plus que la durée de la contrainte au cours des essais est toujours très brève. La tension alternative efficace, correspondant à 350 kV en courant continu, est d'environ 140 kV, tension que le câble a supporté pendant 112 h environ (voir diagramme, fig. 6). Les câbles ont été livrés en tronçons de 370 m, enroulés deux par deux sur une bobine. Les entrées et les sorties sont introduites chacune dans une boîte d'extrémité spéciale. Les raisons pour lesquelles les câbles ont été subdivisés sont indiquées dans la partie théorique qui va suivre. Les boîtes d'extrémité sont prévues pour une tension efficace de claquage de 170 kV, sous pluie tombant à 45° (voir fig. 7). La tension efficace de claquage à sec est de 260 kV en courant alternatif. Ces boîtes d'extrémité peuvent juste supporter les tensions continues maxima de 350 kV pouvant se produire à chaque câble du générateur de chocs.

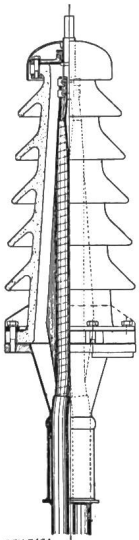


Fig. 7.
Boîte d'extrémité du câble.

Chaque bobine de câbles, y compris ses boîtes d'extrémité et ses éclateurs, est isolée par rapport à la terre, ainsi que l'exige le couplage de Marx. Comme le montre la fig. 2, le premier câble a été monté sur isolateurs en porcelaine, dont la capacité est utilisée pour le fonctionnement de l'oscillographe cathodique. Par contre, le deuxième et le troisième câble sont suspendus chacun à des chevalets en bois, à l'aide de deux chaînes de quatre isolateurs, type «Motor», de modèle récent. Chaque chaîne est soumise en permanence à une traction d'environ 4 t, ce qui n'a présenté jusqu'ici aucune difficulté.

Comme diviseurs de tension et comme condensateurs auxiliaires pour le couplage à tension double, on a utilisé des câbles monophasés normaux pour 50 kV. Ces câbles sont enroulés sur des bobines spéciales à grand noyau. Les boîtes d'extrémité, montées directement contre les bobines, présentent les mêmes dimensions que celles des câbles du générateur de chocs.

A titre d'essai, de mêmes tronçons de câbles ont été branchés directement sur une ligne à 132 kV. Pendant cet essai, aucune avarie ne s'est produite, ni aux câbles, ni aux boîtes d'extrémité, bien que les câbles aient été soumis à une contrainte d'environ 8 kV_{eff}/mm.

Fonctionnement du générateur de chocs.

Les câbles 1 à 3 sont chargés lentement jusqu'à la tension maximum de 350 kV chacun, par l'inter-

médiaire de deux valves électroniques et des câbles auxiliaires, ainsi qu'il ressort du schéma fig. 1. Dès que la tension réglée à l'éclateur F_0 ou F_1 est atteinte, celui-ci fonctionne et fait fonctionner à son tour les éclateurs F_1 à F_3 ou F_0 à F_3 . Les trois câbles sont ainsi branchés en série et déchargés sur la ligne par l'intermédiaire de l'éclateur F_3 .

Les caractéristiques du générateur de chocs sont les suivantes:

Trois câbles présentant chacun une longueur de 2.370 m, un poids de 6,5 t, une capacité de 0,245 μ F, une tension continue de 350 kV. Capacité résultante: 0,0817 μ F; limite théorique de tension: 1050 kV.

Valves électroniques pour tension de blocage de 200 kV ou 400 kV. Transformateur de tension 250/150 000 V. Les transformateurs de chauffage sont des transformateurs d'intensité normaux pour 80 kV. L'effet de choc maximum du générateur atteint:

$$A = U^2 \frac{c}{2} = 1050^2 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,0817 \cdot 10^{-6}}{2},$$

$$A = 45\,000 \text{ Ws} = 45 \text{ kWs.}$$

La mise à la terre du générateur a été réalisée par environ 200 m de ruban de cuivre de 50.3 mm, ce qui a permis d'abaisser la résistance de terre à 2 Ω environ. Cette installation de chocs devant surtout produire des trains d'ondes entre la ligne à essayer et la terre, cette mise à la terre est parcourue naturellement par un courant de choc assez élevé (quelques milliers d'ampères), mais de brève durée. Une mise à la terre aussi peu résistante que possible est nécessaire, afin d'éviter un accroissement de tension inadmissible, par suite de ces fortes intensités, et d'empêcher ainsi que des claquages se produisent sur les lignes à basse tension ou à courant faible. Le ruban de terre se disperse dans les différentes directions, en partant d'un anneau d'environ 10 m de diamètre.

Genre de l'effet de surtension, lors des essais effectués à l'aide du générateur de chocs.

Lorsque les éclateurs F_0 à F_3 du générateur entrent en fonctionnement, un train d'ondes parcourt la ligne à essayer. Si les câbles étaient remplacés par des capacités concentrées, la valeur du train d'ondes se déterminerait par la somme des tensions des capacités chargées, à l'instant du fonctionnement des éclateurs. Or, dans le cas du générateur de chocs à câbles, la capacité n'est pas concentrée, mais répartie sur toute la longueur des câbles. Le train d'ondes prend naissance comme l'indique le schéma fig. 8 a, ou bien, si nous considérons tout d'abord l'intervalle de temps qui s'écoule durant le premier passage de l'onde de décharge du câble, selon le schéma fig. 8 b. Il n'est pas tenu compte des résistances de charge (sans importance pour le processus de choc), ni des capacités entre gaines de plomb et terre, qui sont sans influence dans ce cas.

Pour les trois échelons de câbles, l'amplitude du train d'ondes s'obtient comme suit:

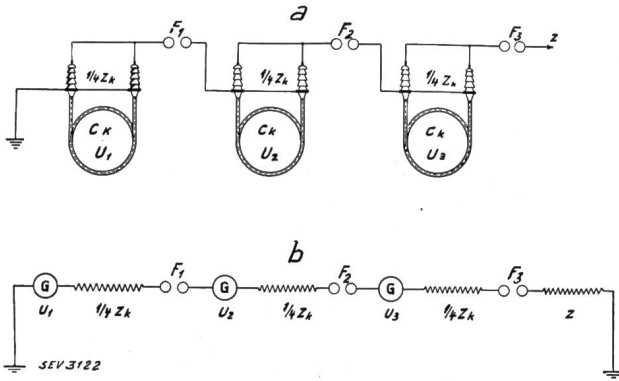


Fig. 8.

a Schéma simplifié du générateur de chocs,
 b Schéma valable pour le premier parcours de l'onde de décharge des câbles lors de la production d'un choc sur une longue ligne aérienne z.

$$U = \frac{Z}{Z + 3Z_k} (U_1 + U_2 + U_3)$$

respectivement pour n échelons d'un générateur de chocs:

$$U = \frac{Z}{Z + nZ_k} \cdot (n \cdot U_1),$$

où U_1 = Tension de charge par échelon;
 Z = Résistance d'onde de la ligne aérienne;
 Z_k = Résistance d'onde résultant d'un condensateur à câbles
 (dans notre cas, deux câbles de 370 m chacun, branchés en parallèle).

Entre la résistance d'onde Z_k , la capacité C_k par kilomètre de longueur, le coefficient d'induction L_k par kilomètre et la constante diélectrique du câble ϵ , il existe, comme on le sait, une relation qui résulte de ce qui suit. Par définition

$$Z_k = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}},$$

en outre, la vitesse de propagation d'une onde

$$v = \sqrt{\frac{1}{L_k C_k}} = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon}},$$

où v_0 = vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^{10}$ cm/s.

On a ainsi

$$Z_k = \sqrt{\frac{1}{v^2 C_k^2}} = \pm \frac{1}{v C_k} = \frac{\sqrt{\epsilon}}{v_0 C_k}.$$

En admettant que la constante diélectrique soit la même pour les processus rapides (ondes) que pour 50 pér./s, on aura dans notre cas, pour $\epsilon = 3,65$ et $C_k = 0,33 \cdot 10^{-11}$ F/cm:

$$Z_k = \frac{\sqrt{3,65} \cdot 10^{11}}{3 \cdot 10^{10} \cdot 0,33} = 19,3 \Omega \approx 20 \Omega.$$

Le rendement de tension du générateur de chocs atteint, dans notre cas, pour $Z = 450 \Omega$ et $Z_k = \frac{1}{4} \cdot 20 \Omega$ (les quatre extrémités de câbles d'un condensateur étant branchées en parallèle)

$$\frac{Z}{Z + 3 Z_k} = 0,968$$

La perte de tension, due aux résistances d'onde des câbles,

$$\alpha = 1 - \frac{Z}{Z + 3 Z_k} = 3,2\%$$

Comme on le voit, les résistances d'onde des câbles agissent comme des résistances internes du générateur de chocs. Un tel générateur n'est donc utilisable que pour quelques échelons, sans grande perte de tension, contrairement à ce qui a lieu dans le cas du couplage de Marx avec capacités concentrées.

Lors de la décharge d'une capacité concentrée, la tension diminue constamment, tandis que la tension de choc du générateur à câbles reste constante durant le temps de passage sur toute la longueur du câble (dans notre cas, environ $2,5 \mu s$). A la mi-temps, les trains d'ondes de décharge provenant des deux extrémités de câble se rencontrent à mi-chemin et, en partant du milieu, suppriment complètement le courant du câble, en doublant simultanément la chute de tension. A la fin du passage simple, tous les câbles sont sans courant et la chute de tension a doublé (2α). Le jeu recommence alors, avec cette différence toutefois, que la tension de chaque câble n'est plus U_0 , mais $U_0 (1 - 2 \alpha)$; avec cette nouvelle valeur de la FEM, le schéma de la fig. 8 est de nouveau valable. Le nouveau train d'ondes de charge sur la ligne Z provoque

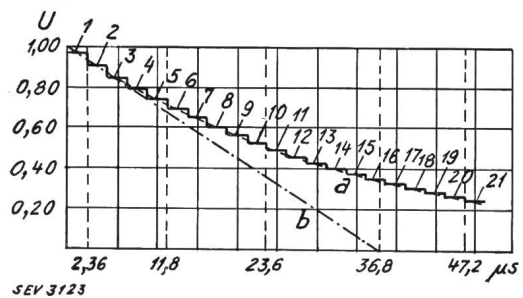


Fig. 9.

a Courbe calculée de la tension aux bornes du générateur de chocs sur une ligne de longueur infinie. Les nombres en regard des différents paliers sont les numéros d'ordre des ondes de décharge dans le câble.
 b Tangente indiquant la constante de temps de la décharge du générateur.

un nouveau train d'ondes de décharge dans le câble, qui abaisse la nouvelle FEM ($1 - 2 \alpha$) encore de $\alpha \%$.

Tandis que la FEM du câble diminue selon les puissances de $(1 - 2 \alpha)$, la tension aux bornes, et, par suite, la tension de choc, est chaque fois de $\alpha \%$ plus faible. Elle suit donc la loi $(1 - 2 \alpha)^n \cdot (1 - \alpha)$, si l'on entend par n le nombre d'ordre des trains d'ondes dans le câble, respectivement le nombre d'ordre des échelons de l'onde de décharge. La fig. 8 montre l'allure calculée de la tension aux bornes des câbles, respectivement la forme du train d'ondes de choc du générateur.

L'amortissement du front du train d'ondes dans le câble a pour résultat que les échelons s'aplatissent rapidement et que la courbe se transforme en une courbe exponentielle, dont la constante de temps est $C \cdot Z$. La différence entre un générateur de chocs à capacités concentrées et celui à câbles disparaît ainsi.

Afin que ce processus de décharge soit valable pour une durée quelconque, il faut toutefois admettre qu'aucun des trains d'ondes ne revient de

chée entre l'extrémité de la ligne et la terre. A l'extrémité de la ligne n'apparaît plus alors que la forme quelque peu aplatie de la tension aux bornes

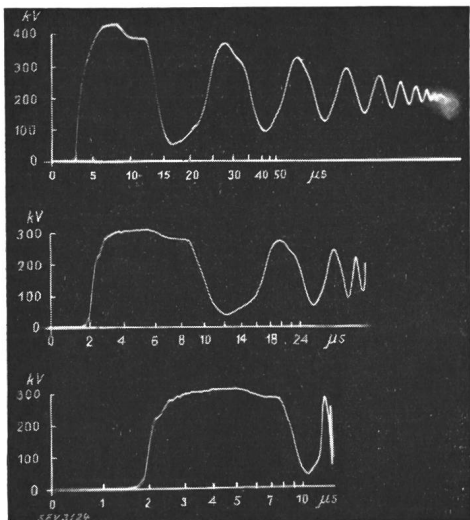


Fig. 10. Oscillogramme du choc de tension positif réfléchi au bout de la ligne d'essai. Les trois courbes représentent trois oscillogrammes à diverses échelles de temps; le premier est relevé à une tension de choc plus élevée que les deux autres.

la ligne essayée, c'est-à-dire que la description ci-dessus n'est valable que pour l'essai de choc d'une ligne infiniment longue. Lorsque la longueur de la ligne n'est pas infinie, le train d'ondes de charge réfléchi revient au générateur par la ligne. Ceci se produit, dans notre cas, avec une longueur de ligne de 900 m, après un peu plus de 6 μ s. La réception par le générateur du train d'ondes réfléchi a lieu comme pour l'émission du train d'ondes de charge, en provoquant une chute de tension dans la résistance d'onde des câbles. Le train d'ondes dans les câbles présente alors également de petits échelons, qui se remarquent à leur tour dans les trains d'ondes de charge lancés dans la ligne. Il s'ensuit que l'oscillation produite dans la ligne d'essai présente aussi de petits échelons en escalier, qui sont toutefois négligeables, car il ne s'agit jamais que de chutes de tension de quelques pour-cent. Le processus d'enclenchement, lors de l'utilisation du générateur de chocs à câbles et de la ligne ci-dessus, est donc tout à fait analogue à celui résultant de l'emploi d'une capacité de choc concentrée. L'allure de la tension mesurée à l'extrémité libre de la ligne, sans parafoudre, est relevée dans la fig. 10 pour des à-coups de tension positifs, et dans la fig. 11 pour des à-coups négatifs de faible hauteur.

L'oscillation correspond à l'enclenchement du court tronçon d'essai, soumis à la forte capacité de choc. Il se produit par conséquent, au début, à l'extrémité de la ligne, une tension à peu près égale au double de celle de la tension d'enclenchement du générateur de chocs.

On sait que cette réflexion est supprimée par une résistance égale à la résistance d'onde, enclen-

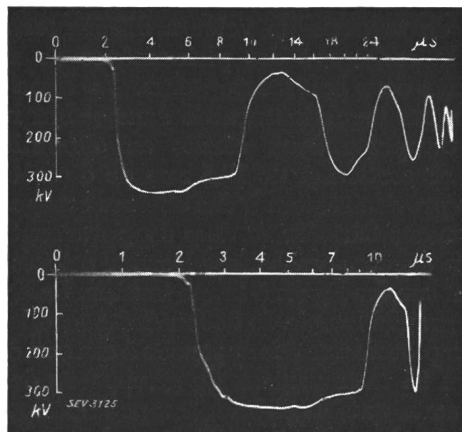


Fig. 11. Oscillogramme du choc de tension négatif réfléchi au bout de la ligne d'essai. Deux échelles de temps.

du câble, par suite du parcours des 900 m de ligne aérienne.

La fig. 12 représente l'allure de la tension mesurée à l'extrémité de la ligne, lorsqu'elle est mise à la terre en ce point à travers une résistance liquide d'environ 560 Ω . La seconde corde de la ligne était ouverte pendant ce temps aux deux extrémités. On distingue en effet deux légers échelons dans l'espace de 6 μ s correspondant à la première demi-onde de la ligne aérienne. Mais ses angles, et surtout ceux qui suivent, sont si aplatis

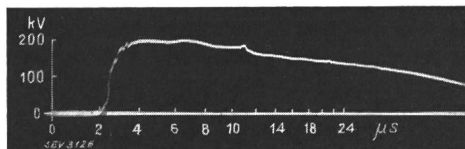


Fig. 12. Oscillogramme de la tension de choc au bout de la ligne d'essai, la réflexion étant supprimée par une résistance ohmique de 560 Ω environ.

par suite du parcours de l'onde le long de la ligne, que c'est à peine si l'on soupçonne encore la courbe de la fig. 9. Par conséquent, la contrainte de tension à l'extrémité de la ligne peut tout aussi bien être produite par le générateur de chocs à câbles que par une capacité concentrée. La forme de la tension sur la corde de ligne excitée dépend en outre de l'influence de la corde voisine, isolée dans le cas particulier. Nous ne pouvons pas nous étendre ici sur cet effet d'influence.

Dispositifs de mesure pour les essais de tensions de choc.

Le générateur de chocs qui vient d'être décrit a été construit en première ligne pour les essais d'appareils de protection contre les surtensions. Il peut toutefois être également utilisé pour d'autres essais, où les ondes à front raide jouent un rôle.

Ainsi, par exemple, les mesures relatives à la forme des trains d'ondes d'influence, dont on a constaté l'allure anormale lors de mesures au cours d'orages. En outre, les mesures d'amortissements de trains d'ondes de tensions de valeurs différentes, et, au besoin, la recherche des phénomènes de réamorçage d'arcs dans les interrupteurs. La ligne d'essai de chocs, sur laquelle travaille dans ce but le générateur, comporte deux cordes en aluminium de 82 mm² de section et de 12,5 mm de diamètre, suspendues provisoirement à des chaînes composées de sept éléments Ohio-Brass. Les supports sont munis en partie d'isolateurs Jeffrey-Dewitt, utilisés précédemment sur des lignes à haute tension. La ligne décrit une grande boucle de 900 m de long; elle se termine à la plateforme des appareils à essayer, distante d'environ 25 m seulement du générateur de chocs, de telle sorte que, de ce poste, on peut aisément surveiller toute l'installation. Chacune des deux cordes de la ligne peut être branchée soit au générateur, soit à une terre, selon que la corde doit servir de fil de phase ou de fil de terre. La plateforme d'essais comporte, outre les appareils à essayer, tout l'appareillage de mesure, ainsi que deux transformateurs d'une puissance unitaire alternative de 2 000 kVA. Ces transformateurs servent à produire des tensions de service jusqu'à une valeur efficace de 35 kV entre ligne et terre, tensions qui sont superposées au train d'ondes de surtension du générateur: ceci, dans le but de déterminer la capacité de soufflage, respectivement la sécurité de fonctionnement des parafoudres. La possibilité de produire une tension efficace quelconque, jusqu'à 35 kV, permet également de déterminer la limite de la tension à laquelle un parafoudre fonctionne encore parfaitement. Afin de protéger les transformateurs eux-mêmes contre toute surtension inadmissible, un parafoudre étalonné spécialement est branché à leurs bornes. Ce

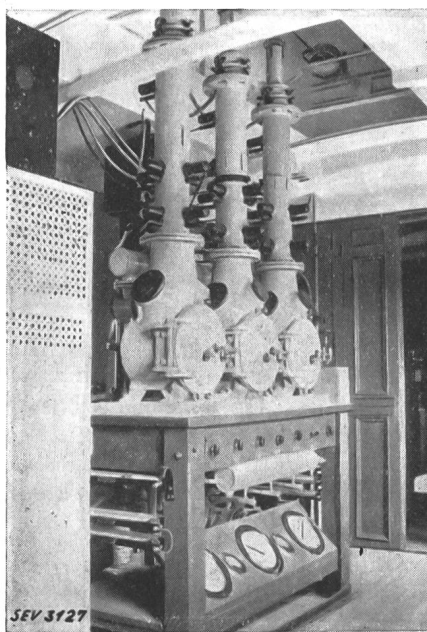


Fig. 13.
Vue de l'oscillographe cathodique tripolaire.

parafoudre empêche que la tension aux bornes des transformateurs dépasse leur tension d'essai, quelle que soit la valeur des ondes de surtension.

Pour l'essai, les parafoudres ne sont soumis tout d'abord qu'au train d'ondes envoyé dans la ligne par le générateur de chocs, ceci afin de pouvoir constater avant tout l'effet de protection des appareils, quant à la réduction de l'amplitude et de la raideur de front de la surtension et quant à la détermination des courants absorbés. Il n'est pas moins important de déterminer la sécurité de fonctionnement de ces appareils de protection. Les parafoudres doivent être à même de supprimer parfaitement, en un bref laps de temps, le passage du courant amorcé. Cette qualité se détermine, en couplage de service, à l'aide des transformateurs de puissance de 2·2000 kVA, courant triphasé.

Les appareils de mesure comportent deux ou, au besoin, trois oscillographes cathodiques avec répartiteurs de tension, pour la mesure des tensions, ainsi que des shunts pour la mesure des intensités. Un éclateur à boules, avec résistance additionnelle d'environ 10⁴ Ω, sert d'instrument de contrôle. L'appareillage de mesure des oscillographes cathodiques est logé dans une voiture de chemin de fer, qui sert également aux mesures en temps d'orage et qui a déjà été décrite antérieurement²⁾. La figure 13 montre une vue des trois oscillographes.

Pour la mesure sans tension de service, le répartiteur de tension est purement ohmique, avec une résistance de 5500, respectivement 11 000 Ω pour la haute tension, et de 40 Ω pour la basse tension, aux plaques de l'oscillographe. Le câble de connexion présente une résistance d'onde de 40 Ω et une longueur de quelques mètres seulement. On obtient ainsi une représentation non déformée du train d'ondes à haute tension.

Pour les mesures effectuées sur la ligne sous tension de service, celle-ci est séparée par une capacité C₁, ainsi qu'une capacité partielle C₂, conformément au couplage de Gábor (fig. 14).

La théorie et les essais montrent, dans ce cas également, qu'une capacité concentrée C₁ peut être remplacée par un court tronçon de câble à haute tension, qui remplit pratiquement le même but

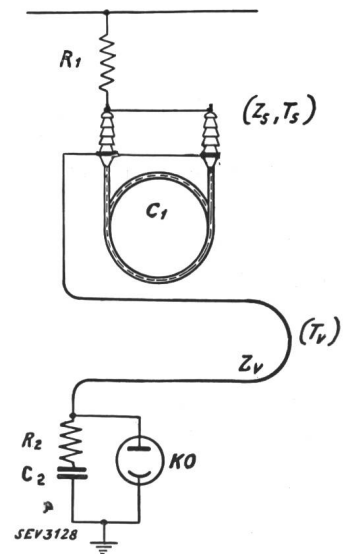


Fig. 14.
Répartiteur de tension d'après Gábor, pour les mesures sur ligne en service.
Constante de temps $T = R_1 C_1 = R_2 C_2$.
Résistance d'onde $Z_v = R_2$.
Durée de parcours d'une onde dans le câble $C_1 = T_s$.
Durée de parcours d'une onde dans le câble $Z_v = T_v$.

²⁾ Bulletin ASE 1931, No. 17.

qu'une capacité concentrée, comme nous allons le montrer.

A la condition qui exige des rapports de transformation égaux

$$\ddot{u} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{C_2}{C_1},$$

ainsi qu'à la liberté de réflexion du câble de freinage $Z_v = R_2$, vient s'ajouter l'exigence de constantes de temps suffisamment grandes:

$$T = C_2 R_2 = C_1 R_1$$

relativement à la durée de passage T_v d'un train d'ondes par le câble de freinage Z_v .

Le rapport des temps $\frac{T_v}{T}$ conduit, selon Gábor, à

une erreur maxima δ_1 dans le rapport de la partie haute tension donnée par l'expression

$$\delta_1 = 2 \frac{T_v}{T}.$$

Si l'on utilise alors, au lieu d'un condensateur C_1 , un tronçon de câble de même capacité, dont la résistance d'onde est Z_s , il est facile de constater que l'erreur additionnelle de mesure δ_2 atteint tout au plus

$$\delta_2 = \frac{Z_s}{R_1},$$

pour autant que les deux extrémités du câble Z_s ne sont pas branchées en parallèle, ou seulement

$$\delta_2'' = \frac{1}{2} \frac{Z_s}{R_1}$$

si les deux extrémités de Z_s sont interconnectées:

Pour $R_1 = 5500 \Omega$, $Z_s = 30 \Omega$, on a

$$\delta_2 = 3 \text{‰};$$

Pour $R_1 = 11\,000 \Omega$, $Z_s = 30 \Omega$, on a

$$\delta_2'' = 1,4 \text{‰}.$$

Tandis qu'un front d'accroissement régulier est représenté comme un front régulier lors de l'emploi d'une capacité concentrée C_1 , on obtient, lors de l'emploi d'un tronçon de câble C_1 , un relevé oscillographique en escalier, avec une durée d'échelon de $2 T_s$ ($T_s =$ durée de parcours du câble Z_s) et un écart d'ordonnées maximum δ_2 . Dans la grande majorité des cas, surtout dans le cas des hautes tensions, il est donc admissible de constituer également la capacité partielle C_1 par un court tronçon de câble, au lieu d'un condensateur concentré.

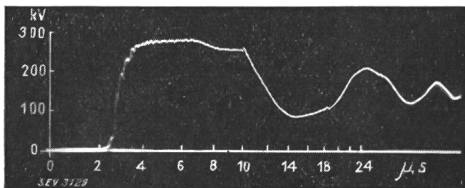


Fig. 15.

Oscillogramme de la tension de choc réfléchie au bout de la ligne d'essai, relevé avec répartiteur de tension à résistances ohmiques selon Gábor, les capacités du répartiteur étant court-circuitées.

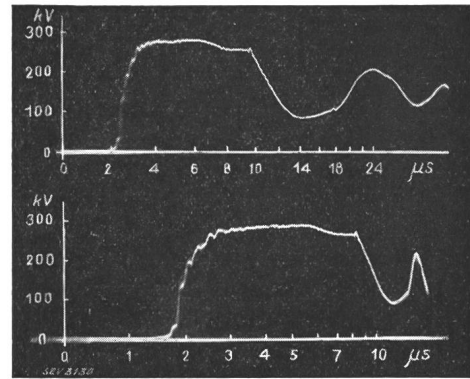


Fig. 16.

Oscillogramme de la même tension que sur la fig. 15, relevé avec répartiteur de tension d'après Gábor, mais la succession de R_1 et C_1 étant inverse de celle indiquée sur la fig. 14. Deux échelles de temps.

Les figures 15 et 16 permettent de comparer la forme des ondes de choc à l'extrémité de la ligne, suivant qu'elles sont mesurées par le couplage de Gábor ou par division purement ohmique. Dans ce cas, à la place de la capacité concentrée C_1 (Gábor), on a connecté un tronçon de câble de 25 m de longueur, d'environ 8000 cm de capacité.

L'emploi de diélectriques identiques (papier imprégné) pour C_1 et C_2 (fig. 14) exclut les influences perturbatrices dues à la variation des constantes diélectriques avec la fréquence. La résistance R_1 est constituée par un ou deux tubes en porcelaine de 1,5 m de longueur chacun, remplis d'une solution de mannite³⁾, qui satisfont le mieux à la double condition d'être courts, tout en restant indépendants de la température. Toutes les surfaces de contact de la solution aux extrémités des tubes (calottes) sont argentées, ce qui maintient la solution pure pendant des années, comme des mesures par temps d'orage l'ont montré.

La succession de C_1 et R_1 était ici inverse de celle indiquée sur la fig. 14, c'est-à-dire que le câble était directement connecté à la haute tension. On voit que la faible capacité du câble vis-à-vis de la terre ne provoque, comparativement aux ondes à front le plus raide possible des figures 10 et 11 qu'un aplatissement de front insignifiant. En revanche, il n'a pas été possible d'obtenir avec la succession R_1-C_1 de la fig. 14 une répartition de la tension maintenant fidèlement la forme de l'onde, comme le prouve la figure 17. Malgré l'écran du câble constitué par la gaine de plomb mise à la terre, il se produit des oscillations qui faussent le rapport de répartition de la tension.

On a toujours obtenu une répartition défectueuse de la tension lorsque la résistance à haute tension R_1 n'atteignait pas directement le début du câble de mesure, mais qu'il subsistait un tronçon intermédiaire, ne fût-ce que de 1 m seulement. Sa capacité vis-à-vis de la haute tension et de la terre constitue une source d'erreur inadmissible. Des essais approfondis ont montré que la répartition de tension la mieux appropriée aux ondes de choc était obtenue par une répartition purement ohmique, de

³⁾ Kohlrausch, Handbuch der praktischen Physik.

faible capacité, que nous utilisons pour tous les essais où l'on ne dispose pas d'une tension de service constante ⁴⁾.

La mesure du courant a lieu selon le schéma figure 18. Le câble d'amenée Z_m , équilibré par la résistance $R_5 = Z_m$, ne présente, comme celui du répartiteur de tension, qu'une longueur de quel-

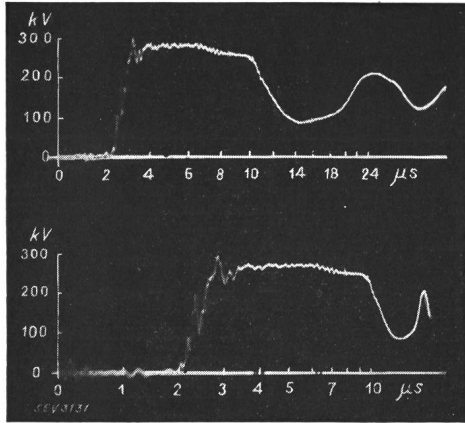


Fig. 17.

Oscillogramme de la tension de choc réfléchie au bout de la ligne d'essai, relevé avec répartiteur de tension d'après le schéma de la fig. 14.

Deux échelles de temps.

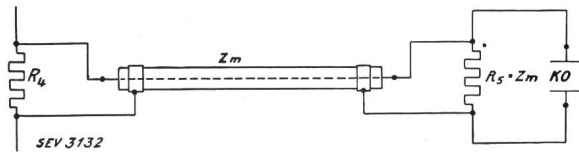


Fig. 18.

Schéma de couplage pour le relevé oscillographique des courants de choc.

ques mètres. La résistance du shuntage R_4 peut être choisie à volonté. La résistance entrant en ligne de compte pour le calcul du courant est celle qui résulte du couplage en parallèle de R_4 et R_5 . Nous n'avons pas l'intention d'indiquer ici les résultats obtenus au cours des essais à l'aide de l'installation de chocs qui vient d'être décrite. Nous ne donnerons, pour terminer, que deux exemples d'oscillogrammes, afin de montrer comment un court tronçon de câble ou un parafoudre moderne disposé à l'extrémité d'une ligne agit sur la raideur et l'allure subséquente du train d'ondes de choc (fig. 19 et 20). Comme on le sait, il est également possible de réduire la raideur de front des ondes de choc en insérant de petites bobines de self entre le générateur de chocs et le commencement de la ligne, ou encore, à l'aide d'une résistance égale à la résistance d'onde, de supprimer l'oscillation à l'extrémité de la ligne et d'imiter ainsi une ligne infinie, lorsqu'on le désire.

Remarquons pour terminer que les échelons du train d'ondes du générateur de chocs (fig. 10, 11 et 12) sont si peu accentués, que l'on ne constate

⁴⁾ Pour des ondes à front extrêmement raide, la répartition capacitive de la tension a aussi ses avantages, mais elle implique l'amenée de la haute tension jusque dans le voisinage immédiat de l'oscillographe cathodique.

pratiquement pas de différence notable avec un générateur de chocs à capacités concentrées. Nous croyons que le générateur à câbles représente une solution équivalente à celle d'une capacité de condensateur pour les essais de chocs des lignes. Cette solution offre en outre l'avantage de ne comporter qu'un nombre d'échelons beaucoup plus restreint (grâce à la résistance de perforation élevée des câbles pour haute tension continue) que ce n'est le cas pour les installations composées d'un très grand nombre de condensateurs individuels, résistances de charge et éclateurs. Les câbles pouvant être montés sans difficulté en plein air, le générateur de chocs à câbles permet en outre de réaliser dans ce cas une notable économie.

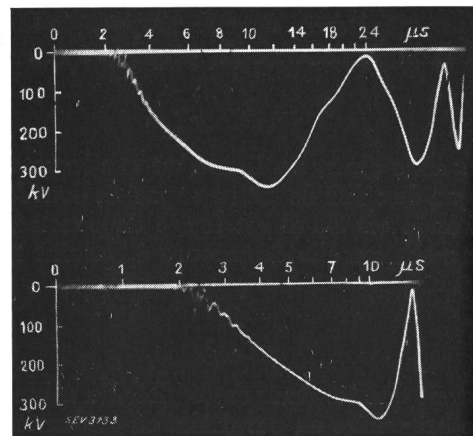


Fig. 19.

Aplatissement du front de la tension de choc par un tronçon de câble de 25 m de longueur, branché en condensateur à l'extrémité de la ligne.

Deux échelles de temps.

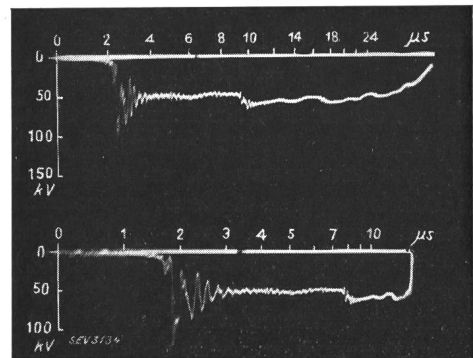


Fig. 20.

Oscillogramme de la tension de choc, le bout de la ligne d'essai étant protégé par un parafoudre moderne.

Deux échelles de temps.

Les auteurs du présent rapport saisissent cette occasion d'exprimer à la direction et au personnel des usines électriques d'Oltten-Aarbourg leur vive reconnaissance pour le montage de l'installation et de la ligne d'essai, ainsi que pour l'aide précieuse qu'ils n'ont cessé de leur accorder au cours des essais. De même, ils remercient chaleureusement la direction de la fabrique de câbles de Brougg S. A., d'avoir mis à leur disposition les câbles à haute tension et les armatures nécessaires.