

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 52 (1961)  
**Heft:** 2

**Artikel:** Protection contre la foudre des câbles posés dans des galeries  
**Autor:** Foretay, E. / Ruchet, R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059032>

### **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>**

# BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Organe commun de l'Association Suisse des Electriciens (ASE)  
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité (UCS)

## Protection contre la foudre des câbles posés dans des galeries

Par E. Foretay et R. Ruchet, Cossonay-Gare

551.594.221 : 621.316.93 : 621.315.21 : 627.842

*Description de l'endommagement par la foudre d'un câble combiné de téléphone et de signalisation à isolation polyéthylène posé dans une galerie d'amenée d'eau. Etude des moyens de protection et essais comparatifs de diverses gaines métalliques.*

*Beschreibung von Blitzschäden an einem kombinierten Telefon- und Steuerkabel mit Polyäthylenisolierung in einem Wasserstollen. Untersuchungen über die Schutzmöglichkeiten und vergleichende Versuche mit verschiedenen metallenen Umhüllungen.*

### I. Introduction

Depuis quelques années les entreprises électriques ont commencé à poser des câbles téléphoniques et de signalisation dans des galeries d'amenée d'eau à veine libre ou sous pression. Parmi les isolants qui satisfont le mieux aux sollicitations particulières

de ces installations – humidité et pression – se trouve le polyéthylène. Cette résine thermoplastique possède des qualités électriques excellentes permettant de répondre aux exigences d'un câble téléphonique et des qualités physiques garantissant un manteau étanche qui empêche pratiquement toute pénétration d'eau à travers l'isolation.

Un des premiers de ces câbles a été posé en juin 1955 dans la galerie reliant le lac de Sambuco à la centrale de Peccia des Forces Motrices de la Maggia (fig. 1). La galerie a une longueur d'environ 5 km et la couverture rocheuse varie entre 200 et 1000 m. Le câble est composé de 48 conducteurs groupés en 4 quartes téléphoniques sous écran et 8 quartes de signalisation. L'isolation est en polyéthylène; il n'y a pas de gaine métallique, le câble étant recouvert d'un manteau de polyéthylène et d'un manteau de chlorure de polyvinyle (PVC). La coupe du câble est donnée par la fig. 2.

Une année après la pose, en juillet 1956, les Forces Motrices de la Maggia (OFIMA) constatent que 12 fils ont de faibles résistances d'isolement; au printemps 1958, il y a 31 fils défectueux. La galerie ne pouvant être vidée, il a fallu attendre jusqu'au mois de mars 1958 pour examiner la nature des défauts et pour en connaître les causes.

### 2. Description des défauts

#### 2.1 Genre des défauts

Nous avons constaté 3 catégories de défauts:

a) Les manteaux en PVC et en polyéthylène sont perforés; au même endroit, perforation de l'isolation du conducteur (G + I);

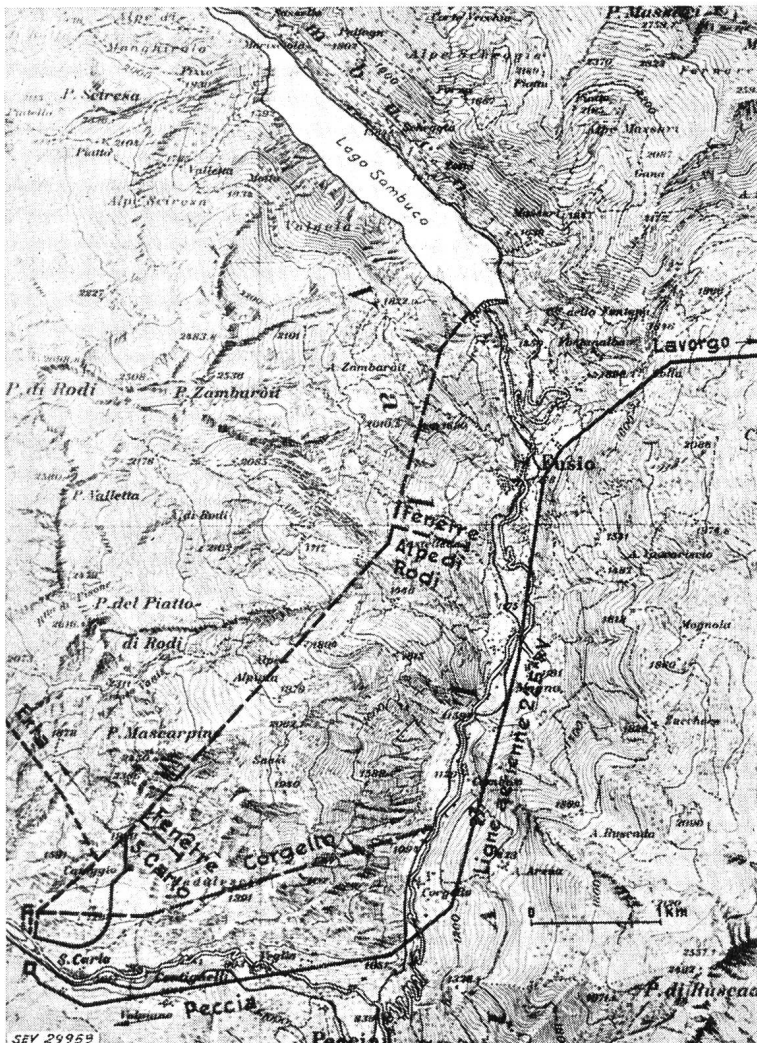


Fig. 1  
Plan de situation

- b) Perforation de l'isolation d'un conducteur (I);  
 c) Les manteaux en PVC et en polyéthylène sont perforés (G).

Les aspects de ces défauts sont représentés par la fig. 3. On remarque que:

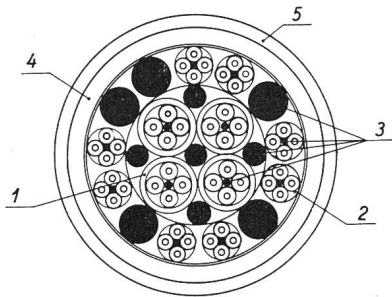


Fig. 2

Coupe du câble posé dans la galerie Peccia-Sambuco

1 4 quartes téléphoniques sous écran (épaisseur d'isolaton 1,2 mm); 2 8 quartes ordinaires (épaisseur d'isolation 1 mm); 3 Bourrages en polyéthylène; 4 Manteau en polyéthylène de 2,9 mm d'épaisseur; 5 Manteau en PVC de 2,5 mm d'épaisseur

Le manteau PVC (fig. 3 a) est perforé d'un trou d'environ 0,5 mm de diamètre; dans la plupart des cas, le PVC est fendu sur une longueur de 6 à 8 cm.

Le manteau en polyéthylène est perforé d'un trou (fig. 3 b) d'environ 0,5 mm de diamètre. Autour du trou, on observe une auréole noirâtre plus ou moins foncée et plus ou moins étendue, suivant les défauts.

La perforation de l'isolation d'un conducteur (fig. 3 c) est en forme de cratère; à l'endroit du défaut, on observe des taches noirâtres sur les écrans des quartes téléphoniques.

Les conducteurs des quartes téléphoniques ne sont pas endommagés.

Ces défauts ont pu être reproduits en laboratoire; les tensions de perforation au choc sont de l'ordre de 300 kV (perforation des deux manteaux et de l'isolation d'un conducteur). L'éclatement du manteau PVC est obtenu si l'on immerge le coupon de câble en essai dans de l'eau ayant une température inférieure à 10 °C; pour une température supérieure, le PVC est perforé mais n'éclate pas.

## 2.2 Détermination de l'ancienneté et de l'emplacement des défauts; structure géologique

Entre juillet 1956 et mars 1958, il a été procédé à plusieurs reprises à des mesures de résistance d'isolement de plusieurs conducteurs. Ceci a permis d'établir approximativement les époques auxquelles les défauts se sont produits. On a constaté que la plus néfaste a été celle s'écoulant entre le 1<sup>er</sup> août 1956 et le 24 janvier 1957 (7 défauts G + I et 7 défauts I soit le 39 % des défauts).

L'emplacement des défauts est donné dans la fig. 4. Afin d'expliquer les emplacements et les causes de ces défauts, il était utile de connaître la structure géologique du massif montagneux. Comme on peut le voir d'après la fig. 4, la partie qui nous intéresse est composée essentiellement de roches primitives et comporte une zone fissurée (éboulis, zone de contact) près de M5 et une fissure près de l'Alpe di Rodi. La résistivité du sol dans cette région est de l'ordre de 1 à 3 · 10<sup>4</sup> Ωm.

Il est significatif que la zone fissurée soit au centre de la partie du tracé où il y a le plus de défauts. En effet, les deux longueurs comprise entre

M4 et M6 totalisent à elles seules 26 points de défauts donc le 76 % des défauts du tronçon Alpe di Rodi - San Carlo. De plus, entre ces deux points, il existe des sources en assez grand nombre et de débit relativement élevé.

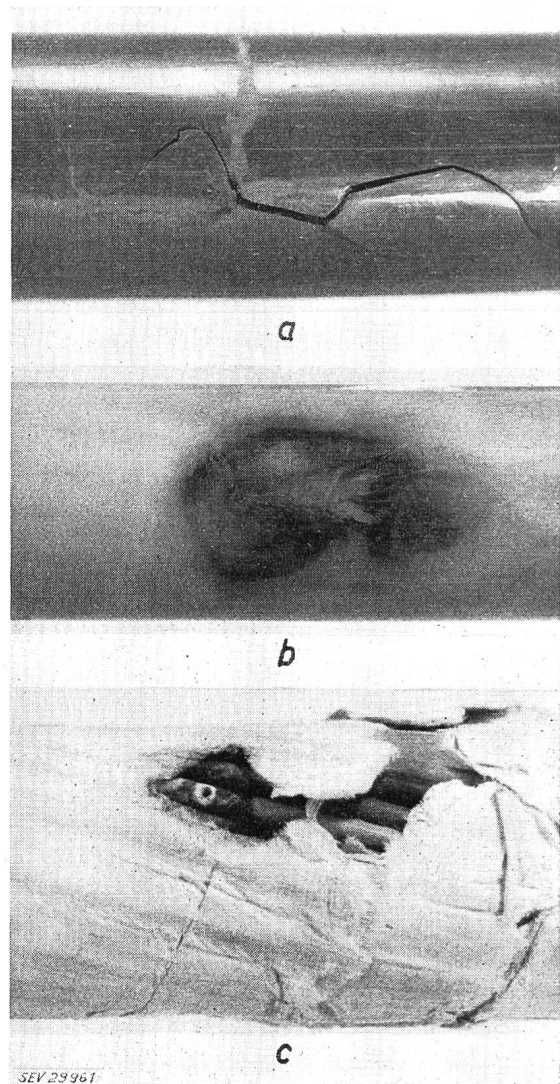


Fig. 3

Points des défauts

a Perforation du manteau en PVC; b Perforation du manteau en polyéthylène; c Perforation de l'isolation d'un conducteur

## 2.3 Cause des défauts

Pour expliquer le phénomène constaté et déterminer son origine, on peut envisager une mise à terre accidentelle de la ligne aérienne 225 kV Lavorgo - Peccia ou des surtensions d'origine atmosphérique.

L'étude détaillée de la première hypothèse montre qu'il est impossible de lui imputer ces défauts; la valeur de la tension longitudinale induite dans le câble, lors d'une mise à terre accidentelle, étant 100 fois plus petite que la tension de perforation mesurée du câble.

Il ne reste donc que la possibilité d'endommagement du câble par la foudre. Vu les tensions de perforation élevées, cette explication est la seule valable; ceci est confirmé par les essais de choc que nous avons effectués pour la reproduction des défauts. Déterminons comment la foudre a pu atteindre le câble. On peut envisager soit un coup de foudre direct sur une des extrémités, soit une pénétration du courant de foudre à travers le massif rocheux:

### 2.3.1 Coup de foudre direct sur une des extrémités

Examinons la première de ces suppositions. Au point d'impact du coup de foudre, il se produit une élévation relativement élevée du potentiel du sol granitique car sa conductibilité est mauvaise; dans un sol homogène, sans câble enterré à proximité, ce potentiel décroît fortement quand on s'éloigne de ce point suivant la loi

$$U_P = I \rho / 2 \pi a$$

où  $U_P$  est la tension existant entre un point  $P$ , situé à la distance  $a$  du point d'impact et un point très éloigné,  $\rho$  est la résistivité du sol,  $I$  l'intensité du courant de foudre. L'extrémité du câble sera pratiquement au même potentiel que le sol environnant,

[9; 10] <sup>1)</sup>). Durant ces deux années, le service de sécurité de l'Electricité de France d'une part et la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension ont eu à s'occuper d'accidents répétés dus à des explosions intempestives de détonateurs électriques dans des galeries en cours de percement pour ouvrages hydro-électriques. Les précisions données dans l'article français [9] montrent que les circonstances de ces accidents présentaient de nombreux points communs: violent orage sur la région, galerie en terrain rocheux très résistant mais aboutissant le plus souvent à une faille humide. Il semble que dans de tels terrains très hétérogènes et plus ou moins disloqués, les courants de foudre au lieu de s'épanouir

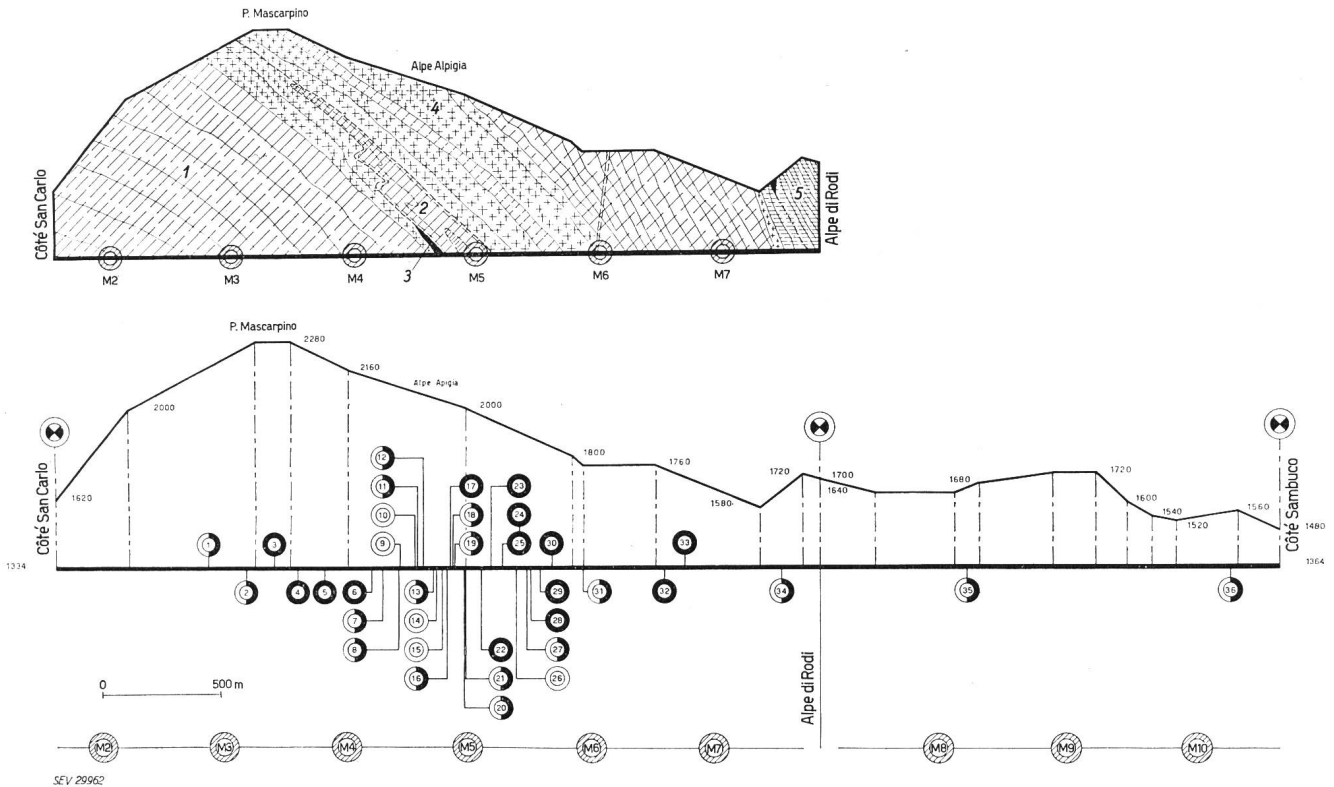


Fig. 4

Profil en long de la galerie avec répartition des défauts et structure géologique du massif rocheux

1 Gneiss clair; 2 Schistes chloriteux; 3 Roches calcaires; 4 et 5 Gneiss plus ou moins schisteux contenant du mica, etc.

● Perforation des deux manteaux et de l'isolation d'un conducteur; ○ Perforation de l'isolation d'un conducteur;

○ Perforation des deux manteaux isolants

Les points «M» désignent les emplacements des jonctions

c'est-à-dire le potentiel du point de chute de la foudre (contournement à l'extrémité, etc.) La propagation dans les conducteurs se fera avec un amortissement relativement faible; par contre, la propagation dans le milieu environnant le câble se fera avec un fort amortissement. A une certaine distance du point d'entrée de l'onde, la différence de potentiel sera suffisante pour obtenir des perforations.

### 2.3.2 Pénétration du courant de foudre à travers le massif rocheux

Considérons maintenant la pénétration du courant de foudre à travers le massif rocheux. De prime abord, il semble impossible que la foudre puisse atteindre un câble enfoui à des profondeurs variant entre 200 et 1000 m. Cependant pour étayer cette hypothèse, on peut mentionner des observations importantes faites pendant les années 1957 et 1958

uniformément puissent se concentrer préférentiellement dans les failles et soient ainsi susceptibles de s'enfoncer à de grandes profondeurs avec une densité appréciable: des accidents se sont produits à une profondeur de l'ordre de 1000 m en dessous de la couverture montagneuse. L'analogie avec le cas que nous avons décrit est frappante.

D'autre part, citons les travaux de M. C. Dauzère [2; 3] et l'article récent du Prof. K. Berger [13]. D'après la première étude les lignes de contact de deux terrains différents offrent ou ont offert une voie d'écoulement facile aux eaux qui circulent dans le sol et dans le sous-sol et qui dissolvent sur leur trajet des matières radio-actives. C'est, en effet, le long de ces lignes que l'on observe actuellement les sources. Les produits radio-actifs sont entraînés et déposés par les eaux le long de ces lignes. Par là

<sup>1)</sup> Voir la bibliographie à la fin de l'article.

même, s'explique l'influence des eaux souterraines sur la foudre qui a été constatée par beaucoup d'observateurs et attribués à tort selon M. C. Dauzère, à leur conductibilité électrique plus grande que celle des roches environnantes. Cette hypothèse n'a pas été confirmée ou infirmée car l'on manque encore d'un réseau suffisamment serré d'observations [8;9]. Le Prof. K. Berger a démontré [13] que dans le cas de roches primitives homogènes, même à plusieurs centaines de mètres de profondeur dans la montagne, on peut avoir lors d'un coup de foudre des tensions très élevées entre les conducteurs du câble et l'eau du tunnel.

Admettons qu'un courant de foudre d'une intensité de 50 kA ait à parcourir une distance de 700 m de son point de chute sur le sol jusqu'au câble et que la résistivité du sol est de 10 k $\Omega$ m. Si l'on se représente la faille comme une veine conductrice noyée dans un milieu relativement isolant, il est possible de calculer approximativement le potentiel autour du câble. On obtient des valeurs de l'ordre de 900 kV qui dépassent de beaucoup la tension de perforation du câble.

Après perforation des deux manteaux et de l'isolation d'un fil, le courant de choc se propagera aussi bien le long des écrans en papier métallisé des quartes téléphoniques que le long des conducteurs. La différence d'amortissement entre ces deux chemins de propagation amènera à une certaine distance du point de perforation, la formation d'une différence de potentiel suffisante pour perforer l'isolation d'un conducteur. La résistance ohmique des écrans étant de 40  $\Omega$ /km et la tension de perforation au choc d'un fil isolé étant d'environ 50 kV, il suffira d'un courant relativement peu élevé pour que, grâce à la chute de tension, la tension de perforation soit atteinte.

Le mécanisme des perforations décrit sous 2.3.2 semble bien expliquer la répartition des défauts sur le tracé Alpe di Rodi - San Carlo; d'autant plus que la plupart des défauts G + I et G se trouvent dans la zone des failles, donc entre M4 et M6.

### 3. Moyens de protection contre la foudre

#### 3.1 Généralités

Une protection des câbles et de leurs jonctions est donc nécessaire. La protection des extrémités et des appareils reliés au câble n'a pas été envisagée car elle peut se réaliser par des moyens classiques (parasurtensions, etc). Les divers procédés permettant la protection du câble de la Maggia ainsi que d'une manière générale, ceux des câbles exposés aux surtensions atmosphériques ont été étudiés.

Tout d'abord, il a été proposé pour le câble Maggia un système de protection constitué par une enveloppe cylindrique fendue en PVC dans laquelle seraient noyés 5 fils de cuivre de 4 mm<sup>2</sup> répartis symétriquement autour du câble. Un calcul rapide montre que la tension induite s'élèverait à environ 90 kV/km si l'on admet que la raideur de front  $di/dt$  de l'onde de courant se propageant dans ces fils est de 0,2 kA/ $\mu$ s. Cependant, vu l'approximation faite pour  $di/dt$ , il faut admettre que cette tension pourrait varier entre 50 et 200 kV/km. Cette

protection offre peu de marge de sécurité car, rappelons-le, la tension de perforation du câble est de l'ordre de 300 kV et la longueur du tronçon endommagé est de 3,5 km.

Nos essais comparatifs entre différentes gaines métalliques de protection contre la foudre sont décrits ci-après. Ces essais ont permis de trouver une gaine métallique ayant les caractéristiques voulues en conservant l'avantage de la légèreté et de l'étanchéité du câble thermoplastique par rapport au câble sous plomb à conducteurs isolés au papier. Pour le dimensionnement des gaines métalliques de protection, il était intéressant de connaître l'ordre de grandeur du courant pouvant circuler dans ces gaines. Aussi il a été entrepris des essais sur modèle afin de déterminer les valeurs relatives du courant en fonction de la profondeur à laquelle sont enterrés les câbles. D'après les résultats obtenus par le Prof. K. Berger [13], pour un courant de foudre de 60 kA le courant circulant dans la gaine métallique varierait entre 6 et 30 kA (10 %...50 %) suivant la profondeur en dessous de la couverture rocheuse homogène (respectivement 500 à 100 m). Si l'on admet un courant de 30 kA, d'une durée de mi-amplitude de 200  $\mu$ s, on peut calculer que l'échauffement sera d'environ 10 °C pour une gaine en cuivre ayant une section de 10 mm<sup>2</sup>.

#### 3.2 Propagation du courant de foudre le long d'un câble enterré

Avant de procéder aux essais comparatifs, il était utile d'étudier comment le courant de foudre se propage le long d'un câble enterré. Plusieurs auteurs [1; 13; 15; 16; 17] et en particulier E. D. Sunde [14] ont traité cette question. La quintessence de ces travaux peut être résumée de la façon suivante:

- a) pour un câble qui n'est pas perforé au point d'impact, la différence de potentiel entre conducteurs et gaine métallique décroît en fonction de la distance au point d'impact.
- b) pour un câble qui est perforé au point d'impact, la différence de potentiel entre conducteurs et gaine métallique croît en fonction de la distance au point d'impact.
- c) le choc de courant se propage le long de la gaine et s'écoule progressivement dans le sol environnant.
- d) Les différences de potentiel entre conducteur et gaine métallique sont proportionnelles à l'amplitude du courant, à la résistance de la gaine, aux racines carrées de la durée de mi-amplitude et de la résistivité du sol.

#### 3.3 Moyens de protection

Les moyens de protection que l'on peut envisager sont les suivants:

- a) renforcement de l'isolation,
- b) augmentation de la composante inductive de l'impédance de la gaine métallique,
- c) une gaine métallique de résistance ohmique aussi faible que possible.

L'étude de la première solution montre qu'un manteau isolant même renforcé ne peut pas résister aux tensions envisagées.

La deuxième solution est obtenue par l'adjonction d'une armure supplémentaire ou en posant le câble dans un tuyau de fer. Une réalisation pratique est décrite dans l'article [18] résumé ci-après. La construction du câble est la suivante: gaine en plomb sur le faisceau, une couche de jute, deux feuillards en fer et une armure en fils ronds. Le courant de foudre  $I$  se répartit entre l'armure en fils ronds de résistance ohmique  $R$  et entre la gaine de plomb de résistance  $R_g$ . Les feuillards de fer forment une inductivité  $L$  qui est en série avec  $R_g$ . Cette inductivité, du fait de sa grande impédance, a pour effet de diminuer fortement le courant dans le circuit  $L$  et  $R_g$ ; le courant s'écoule principalement dans l'armure en fils ronds. On obtient ainsi une forte réduction de la tension entre gaine et faisceau. Mais le facteur le plus important est sans aucun doute la résistance ohmique de la gaine métallique. On a cherché à obtenir une gaine de protection de construction simple et ayant une résistance ohmique aussi faible que possible; nos essais se bornaient à cette solution.

### 3.4 Circuit d'essai

Le schéma général du circuit d'essai est représenté dans la fig. 5. La gaine métallique et le ou les conducteurs des câbles essayés sont court-circuités

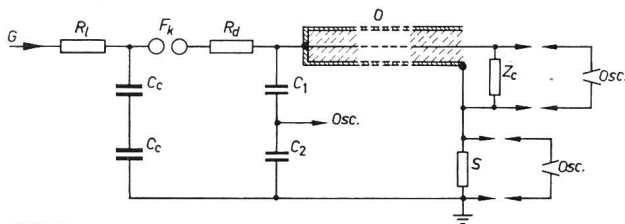


Fig. 5

Schéma général du circuit d'essai

$G$  source de courant continu (redresseur 200 kV);  $R_2$  résistance de charge;  $C_c$  condensateur de 4  $\mu$ F;  $F_k$  éclateur à sphère;  $R_d$  résistance d'amortissement;  $Z_c$  impédance caractéristique du câble essayé;  $Osc.$  oscillographe cathodique à un faisceau;  $C_1, C_2$  diviseur capacitif pour la commande du relais de déblocage du faisceau de l'oscillographe;  $S$  shunt non inductif de 0,016  $\Omega$  d'après Bellaschi [11];  $O$  câble en essai

à l'extrémité reliée au générateur de choc et, à l'autre bout, on oscillographie successivement la tension entre conducteurs et gaine et le courant passant dans la gaine.

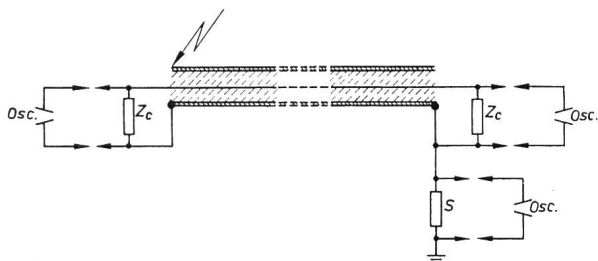


Fig. 6

Schéma de l'essai du câble non court-circuité  
Désignations voir fig. 5

La mesure de la tension se fait directement aux bornes de l'impédance terminale  $Z_c$  ou entre une de ses bornes et un point intermédiaire afin d'obtenir un diviseur de tension. Pendant cette mesure,

le shunt  $S$  est court-circuité. La mesure du courant se fait au moyen du shunt  $S$ .

On peut objecter que le fait de court-circuiter la gaine et les fils à un bout ne représente que les cas où la foudre tombe sur l'extrémité du câble ou de la perforation en plein câble; mais que le cas du coup de foudre en plein câble, sans perforation, n'a pas été représenté. Tenant compte de cette objection, nous avons procédé à un essai selon le schéma représenté dans la fig. 6. Les résultats obtenus avec cette disposition montrent que la somme des deux tensions mesurées à chaque extrémité est, à peu de choses près, égale à la tension mesurée dans le cas du câble court-circuité. Il est donc suffisant de faire les essais selon le schéma de la fig. 5.

### 3.5 Objets essayés

Pour déterminer l'efficacité des gaines métalliques de protection, des essais comparatifs entre dix objets ont été faits. Il s'agit d'un câble coaxial sur lequel on a appliqué successivement 5 gaines différentes (objets n<sup>os</sup> 1 à 5); de 3 coupons de câble en retour de la Maggia que l'on a revêtus de cuivre en ayant, au préalable, ôté le manteau PVC (objets n<sup>os</sup> 6 à 8); de deux câbles 1 kV à isolation papier, l'un avec gaine ondulée en cuivre (objet n<sup>o</sup> 9) et l'autre avec gaine ondulée en acier (objet n<sup>o</sup> 10).

La nature des gaines métalliques est décrite ci-après:

#### 3.5.1 Câble coaxial

(diamètre sur isolation: 22 mm)

**Objet n<sup>o</sup> 1 :** un ruban Cu 25  $\times$  0,15 mm, pas du ruban : 22,5 mm, recouvrement : 2,5 mm.

**Objet n<sup>o</sup> 2 :** dito n<sup>o</sup> 1 mais en plus un second ruban Cu 25  $\times$  0,15 mm enroulé en sens inverse.

**Objet n<sup>o</sup> 3 :** une armure de fils méplats, type F, de 1,2 mm d'épaisseur, nombre de fils : 12, pas à droite : 134 mm, section d'un fil : 6,84 mm<sup>2</sup>, diamètre sur l'armure : 25,5 mm.

**Objet n<sup>o</sup> 4 :** comme n<sup>o</sup> 3 mais en plus une couche de jute préimprégné et une deuxième armure en fils méplats de 1,2 mm d'épaisseur, nombre de fils : 14, pas à gauche : 128 mm, diamètre sur l'armure : 29,7 mm.

**Objet n<sup>o</sup> 5 :** une gaine plomb de 1,7 mm d'épaisseur.

#### 3.5.2 Coupons de câble en retour de la Maggia

(voir fig. 2)

**Objet n<sup>o</sup> 6 :** 2 rubans Cu 25  $\times$  0,15 mm enroulés en sens inverse, 1<sup>er</sup> ruban : pas 22 mm, recouvrement : 3 mm, diamètre sur le ruban : 44,6 mm, 2<sup>e</sup> ruban : pas 21,6 mm, recouvrement : 3 mm, diamètre sur le ruban : 45,1 mm.

**Objet n° 7 :** 2 rubans Cu 25 × 0,15 mm enroulés dans le même sens avec déjoint,  
pas des rubans : 27,5 mm,  
diamètre ext. sur le ruban : 44,9 mm.

**Objet n° 8 :** 2 rubans Cu 25 × 0,20 mm enroulés en sens inverse,  
1<sup>er</sup> ruban : pas : 22 mm,  
recouvrement : 3 mm,  
diamètre sur le ruban: 44,6 mm,  
2<sup>e</sup> ruban : pas : 21,6 mm,  
recouvrement : 3 mm,  
diamètre sur le ruban: 45 mm.

### 3.5.3 Coupons de câble à gaine métallique ondulée

**Objet n° 9 :** Gaine ondulée en cuivre:  
diamètre int.: ≈ 21,5 mm,  
diamètre ext.: 28,8 mm,  
épaisseur : ≈ 0,6 mm.  
Cette gaine est recouverte d'une couche de bitume spécial et d'un manteau en PVC (diamètre sur manteau PVC : 34,5 mm).

**Objet n° 10 :** Gaine ondulée en acier:  
diamètre int.: 23,5 mm,  
diamètre ext.: 30,2 mm,  
épaisseur : ≈ 0,5 mm.  
Cette gaine est recouverte d'une couche de bitume spécial et d'un manteau en PVC (diamètre sur manteau PVC : 35 mm).

Les longueurs de huit premiers objets sont d'environ 50 m, pour les deux derniers elles sont environ de 100 m. Mis à part l'objet n° 1 qui était déroulé complètement, tous les autres câbles ont été essayés enroulés sur tambour sur 80 % de leur longueur.

### 3.6 Résultats des essais

Tous les résultats sont rassemblés dans le tableau I.

#### 3.6.1 Mesures sur le câble coaxial

On constate que d'une façon générale, l'impédance diminue quand le courant augmente. L'impédance la plus faible est celle du double ruban de cuivre (objet n° 2) et sa valeur est pratiquement égale à la résistance mesurée en courant continu; il en est aussi de même pour la gaine Pb (objet n° 5). Les gaines avec fils méplats en acier (objets n° 3 et 4) sont nettement moins favorables. Remarquons que les déphasages pour les gaines en cuivre et en plomb sont pratiquement nuls, par contre le courant est en retard d'environ 12 à 15 μs pour les armures en fer méplat. La résistance ohmique de la gaine d'un ruban Cu (objet n° 1) est sensiblement égale à celle mesurée pour un courant de choc d'environ 4 kA; la valeur en est toutefois 5 fois supérieure à celle de la gaine composée de 2 rubans de cuivre (objet n° 2).

Essais comparatifs de diverses gaines métalliques

Tableau I

Objet n°	Composition de la gaine	Valeur de crête du courant	Chute de tension calculé pour 1 km	Résistance de la gaine métallique sous courant de choc (rapport $\hat{U}/\hat{I}$ )	Résistance de la gaine métallique mesurée en courant continu	Résistance calculée d'un cylindre creux ayant la même épaisseur que la gaine métallique	Résistance calculée des rubans en parallèle en admettant que les spires sont isolées les unes par rapport aux autres
		$\hat{I}$ kA	$\hat{U}$ V	$R_n$ Ω/km	$R_c'$ Ω/km	$R_c$ Ω/km	$R_n$ Ω/km
1	Cu, 25 × 0,15, ∅ 22	1	7 000	7	5,14	1,68	14,46
		2	13 000	6,5			
		3	17 800	5,93			
2	2 × Cu, 25 × 0,15, en sens inverse, ∅ 22	1	1 100	1,1	1,02	0,84	7,12
		2	2 200	1,1			
		3	3 300	1,1			
3	Fe, 1,2 méplat, ∅ 22	1	6 500	6,5	2,02	1,38	1,77
		2	10 600	5,3			
		3	15 100	5,03			
4	2 × Fe, 1,2 méplat en sens inverse, ∅ 22	1	1 760	1,76	0,85	0,64	0,85
		2	3 300	1,65			
		3	4 500	1,5			
5	Pb, épaisseur 1,7 mm, ∅ 22	1	1 600	1,6	1,59	1,65	—
		2	3 240	1,62			
		3	4 840	1,61			
6	2 × Cu, 25 × 0,15, en sens inverse, ∅ 44	1	1 100	1,1	1,2	0,42	14,8
		2	2 140	1,07			
		3	3 200	1,06			
7	2 × Cu, 25 × 0,15, dans le même sens avec déjoint, ∅ 44	1	4 600	4,6	3,06	0,42	12,1
		2	7 600	3,8			
		3	9 700	3,23			
8	2 × Cu, 25 × 0,20, en sens inverse, ∅ 44	1	1 320	1,32	0,58	0,32	11,1
		2	2 440	1,22			
		3	3 200	1,07			
9	Gaine ondulée en cuivre, ∅ 25	1	540	0,54	0,53	—	—
		2	1 100	0,55			
10	Gaine ondulée en acier, ∅ 27	1	16 000	16,0	5,22	—	—
		2	33 600	16,8			

### 3.6.2 Mesures sur le câble Maggia

La gaine de protection la plus avantageuse est composée de 2 rubans de cuivre enroulés en sens inverse (objets n<sup>os</sup> 6 et 8).

### 3.6.3 Mesures sur les câbles à gaines ondulées

La gaine ondulée en cuivre donne d'excellents résultats. On constatera l'influence de l'acier sur la résistance apparente au choc de la gaine ondulée en cette matière (déphasage du même ordre de grandeur que pour les objets n<sup>os</sup> 3 et 4).

### 3.6.4 Comparaison des résultats

Pour un matériau amagnétique, la tension entre les conducteurs et la gaine métallique est pratiquement égale au produit de la résistance ohmique de la gaine, mesurée en courant continu, par le courant de choc.

Les résultats obtenus avec la gaine composée de deux rubans de cuivre enroulés dans le même sens, ne semblent pas indiquer qu'il y ait une composante inductive importante (d'après [12] environ 2,5 % par rapport à la résistance ohmique); le serrage entre les couches des deux rubans joue un plus grand rôle. Avec les rubans en sens inverse les inductivités des deux couches se compensent et les contacts entre spires sont plus nombreux.

On constate que les gaines métalliques constituées par deux rubans de cuivre enroulés en sens inverse ou la gaine ondulée en cuivre sont les meilleures au point de vue électrique. Ces écrans seront protégés mécaniquement par un manteau plastique extérieur.

Il est bien évident que lors d'un coup de foudre, le courant de choc, pour se propager le long de la gaine métallique, devra passer à travers le manteau extérieur. Si ce dernier est isolant, il sera perforé et l'eau de la galerie pourra pénétrer jusqu'à l'écran en cuivre; vu la très bonne résistance du cuivre, le danger de corrosion est pratiquement négligeable.

## 4. Conclusions

L'endommagement du câble Peccia - Sambuco démontre qu'un câble souterrain, même s'il est enfoui à une grande profondeur, n'est pas à l'abri des coups de foudre; le danger de perforation croît fortement lorsque la conductibilité du sol est faible ou si sa structure est hétérogène, car dans ce cas, les courants de foudre au lieu de s'épanouir uniformément peuvent se concentrer dans les failles.

Les résultats des essais montrent que les gaines métalliques de protection les meilleures sont celles

constituées par des rubans de cuivre enroulés en sens inverse ou la gaine ondulée en cuivre. Leur résistance ohmique est comprise entre 0,4 et 1  $\Omega$ /km et du même ordre de grandeur que celle des gaines de plomb; ces valeurs sont pratiquement suffisantes pour la plupart des cas.

Les auteurs tiennent à remercier la Direction des Forces Motrices de la Maggia pour l'autorisation de publier cette étude et pour toutes les facilités qui leur ont été accordées.

### Bibliographie

- [1] Meister, H.: Protection des installations téléphoniques contre la foudre. Bull. techn. PTT t. 36(1958), n° 1, p. 13...32.
- [2] Dauzère, C.: Sur la localisation des coups de foudre dans certaines régions. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 6<sup>e</sup> session 1931, t. 3, rapp. 25.
- [3] Dauzère, C.: Sur la localisation des coups de foudre. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 7<sup>e</sup> session 1933, t. 3, rapp. 74.
- [4] Couvreur, H. E.: Orage et foudre. Etude physique de leur formation et de leurs effets sur les réseaux électriques. Moyens de protection. Bull. Soc. belge Electr. t. 72(1956), n° 3, p. 173...194, n° 4, p. 287...295; t. 73(1957), n° 1, p. 13...22, n° 2, p. 107...119.
- [5] CCIF 1938: Directives concernant la protection des lignes de télécommunication contre les actions nuisibles des lignes électriques industrielles.
- [6] Viel, G.: Détermination des zones exposées à la foudre au moyen de mesures de la conductibilité électrique de l'air. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 8<sup>e</sup> session 1935, t. 3, rapp. 307.
- [7] Gibrat, R.: Etude statistique sur les relations entre la conductibilité électrique de l'air et le danger provenant de la foudre. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 8<sup>e</sup> session 1935, t. 3, rapp. 314.
- [8] Berger, K.: Etat actuel des questions techniques dans le domaine de la foudre et des surtensions. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 12<sup>e</sup> session 1948, t. 3, rapp. 327.
- [9] Laurent, P.-G.: Considérations sur la foudre et sur la protection des bâtiments contre ses effets. Bull. Soc. franç. Electr. 7<sup>e</sup> sér., t. 8(1958), n° 87, p. 154...172.
- [10] Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH): Rapport sur l'exercice de 1957. Bull. ASE t. 49(1958), n° 17, p. 808...809.
- [11] Foitzik, R.: Versuche mit grossen Stoßströmen. Elektro-techn. Z. t. 60(1939), n° 4, p. 89...92, n° 5, p. 128...133.
- [12] Arrighi, R.: Etude du comportement des écrans métalliques des câbles à isolation solide soumis à des courants de court-circuits. Bull. Soc. franç. Electr. 7<sup>e</sup> sér., t. 9(1959), n° 107, p. 649...665.
- [13] Berger, K.: Notwendigkeit und Schutzwert metallischer Mäntel von Sekundärkabeln in Höchstspannungsanlagen und in Hochgebirgsstollen, als Beispiel der Schutzwirkung allgemeiner Faradaykäfige. Bull. ASE t. 51(1960), n° 11, p. 549...563.
- [14] Sunde, D.: Earth Conduction Effects in Transmission Systems. New York: Van Nostrand 1949.
- [15] Griesinger W., E. Popp und E. Schulz: Über die Verteilung der Blitzströme in der Erdungsanlage eines Funkturmes. ETZ-A t. 79(1958), n° 15, p. 526...529.
- [16] Coleman, B. L.: The Direct Lightning Stroke to a Buried Cable. The Electrical Research Association (ERA), Techn. Rep. S/T71. The British Electrical and Allied Industries Research Association. Leatherhead: 1951.
- [17] Zapletal, M.: Schutz von Fernmeldekabeln gegen direkten Blitzschlag. (= tschech.) Elektro-techn. Obz. t. 48(1959), n° 8, p. 40...406.
- [18] Anonym: Über den Einfluss von Blitzschlägen auf Luftkabel. Bull. ASE t. 30(1939), n° 12, p. 308...309.

### Adresse des auteurs:

E. Foretay, ingénieur-conseil, et R. Ruchet, ingénieur. S. A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare (VD).