

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 41 (1950)  
**Heft:** 13

**Artikel:** Oscillation de câbles électriques aériens après la chute de surcharges  
**Autor:** Oertli, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1058917>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 08.02.2026

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

# BULLETIN

## DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

### Oscillations de câbles électriques aériens après la chute de surcharges

Par H. Oertli, Berne

621.315.1.056.3

Dans une portée d'une ligne à 150 kV des Forces Motrices Bernoises S. A. un des câbles a été chargé avec des poids. Les oscillations qui se manifestèrent après le déclenchement de ces poids furent cinématographiées. Cet article fournit des agrandissements dessinés de prises cinématographiques, des trajectoires du milieu du câble oscillant et des diagrammes des oscillations en fonction du temps pour différents dispositifs de suspension du câble. Sur la base de suppositions simplificatrices, on calcule les positions les plus élevées atteintes par le câble oscillant et on compare les résultats avec les valeurs mesurées. Finalement, on considère la signification pratique des résultats des essais.

An einer 150-kV-Leitung der Bernischen Kraftwerke A.-G. wurde ein Stromleiterseil in einem Spannungsfeld mit Gewichten belastet. Die dem Lastabwurf folgenden Seilschwingungen wurden kinematographisch aufgenommen. Der vorliegende Artikel enthält zeichnerische Vergrößerungen aus Filmbildern, die Bahnen der Mitte des schwingenden Seiles und den zeitlichen Verlauf der Seilschwingungen bei verschiedenen Stromleiteraushängungen. Die Höchstlagen des schwingenden Seiles werden unter vereinfachenden Annahmen berechnet, und die Ergebnisse werden mit den gemessenen Werten verglichen. Zum Schluss wird die praktische Bedeutung der Versuchsergebnisse beurteilt.

(Traduction)

Les expériences faites pendant l'hiver 1929/30 sur la ligne à 150 kV Innertkirchen—Bickigen engagèrent les Forces Motrices Bernoises S. A. à étudier expérimentalement les mouvements des câbles électriques aériens provoqués par la chute de surcharges. A l'exception des brèves allusions mentionnées sous <sup>1)</sup>, <sup>2)</sup> et <sup>3)</sup>, les résultats des essais exécutés en 1930 sous la direction de l'auteur n'ont pas encore été publiés. Donnant suite aux sollicitations de collègues spécialistes, il les publie maintenant, avec l'autorisation des Forces Motrices Bernoises S. A. Il prie toutefois le lecteur de se rappeler l'époque à laquelle les essais ont été effectués. En 1930, on ne possédait pas encore sur ce sujet les connaissances techniques actuelles; en particulier, on ne connaissait ni les lois de similitude étudiées par Hunziker, ni ses essais sur modèles <sup>4)</sup>, <sup>5)</sup>. Aujourd'hui, on pourrait résoudre la plus grande partie des problèmes d'alors en un temps beaucoup plus court et avec moins de frais. En 1930, il fallait aboutir à bref délai à des résultats utilisables pratiquement. Des essais directs sur la ligne à haute tension furent donc nécessaires. Comme les portées où s'étaient produits les dérangements se trouvaient

en montagne, d'autres portées facilement accessibles furent choisies pour les essais. L'étendue et la durée de ces essais durent être limitées, de sorte qu'une série d'essais et de mesures, qui auraient été souhaitables et utiles pour compléter les essais effectués, ne purent être exécutés.

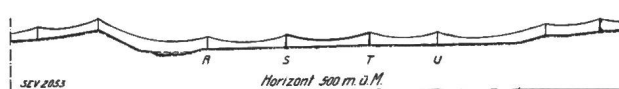


Fig. 1

Profil longitudinal schématique du premier tronçon soumis aux essais

Echelle 1 : 30 000 environ, sauf pour les pylônes et le câble

#### Dispositifs utilisés pour les essais

Pour reproduire la surcharge de givre et de neige, on appliqua au câble soumis à l'essai — aluminium-acier (170,5 mm<sup>2</sup> Al + 39,8 mm<sup>2</sup> ac.) — des poids en fonte, en intercalant des pinces pour ménager le câble, ainsi que des appareils déclencheurs mécaniques pour le détachement des poids. Les monteurs déclenchèrent ces dispositifs après un signal préparatoire au moment d'un coup de revolver de l'ingénieur dirigeant les essais. Ces procédés donnaient satisfaction de sorte que l'on n'eut pas à regretter d'avoir dû renoncer à des dispositifs compliqués, étant donné le temps restreint dont on disposait pour la mise au point de ces essais.

Les mouvements du câble furent enregistrés sur des films de 35 mm avec deux appareils cinématographiques d'amateur, dont, en principe, l'un devait filmer les mouvements verticaux et l'autre les mouvements latéraux du câble déchargé. Le nombre d'images de 16/s était suffisant; il n'était pas nécessaire d'augmenter le nombre d'images par seconde.

<sup>1)</sup> Die Trapez-Halbabspannung für Hochspannungsleitungen der Bernischen Kraftwerke A.-G., Bern. Bull. SEV 1931, n° 13, p. 309; Elektrotechn. Z. 1933, n° 51, p. 1243. Compte rendu de la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques 1933, Tome II, p. D-62.

<sup>2)</sup> A. Roth, Hochspannungstechnik. Julius Springer, Wien. 2. édition, 1938, p. 507; 3. édition, 1950, p. 1534.

<sup>3)</sup> H. Oertli und W. Köchli. Die 150-kV-Leitung Innertkirchen-Wimmis-Mühleberg der Bernischen Kraftwerke A.-G. Bull. SEV 1944, n° 3, p. 57.

<sup>4)</sup> G. Hunziker, Schnellhöhe und Modellmechanik. Leemann & Cie. Zurich. 1942.

<sup>5)</sup> G. Hunziker, Mechanische Freileitungsmodelle. Bull. SEV 1942, n° 9, p. 242; extrait du livre 4.

On photographia en même temps une horloge, ainsi que des règles graduées pour la mesure des longueurs; avant et après les prises de vue cinématographiques, on mesura la position de repos du câble à l'aide d'un théodolite. Les films cinématographiques permirent de déterminer la position du



Fig. 2

Milieu de la portée S...T

Les pylônes S et T sont équipés de semi-ancrages. Un poids de 560 kg est suspendu au câble; il peut être déclenché par un petit mouvement de levier.

câble dans l'espace en fonction du temps; on projeta, avec un agrandissement convenable, les films sur une paroi et l'on dessina les agrandissements des images que l'on trouva spécialement intéressantes (voir par exemple les figures 4, 5 et 6).

### Essais

Le premier tronçon soumis aux essais est reproduit par la figure 1. Les pylônes R, S, T, U se dressaient sur un terrain légèrement montant vers le pylône U; au pylône R la ligne faisait un angle de  $2^\circ$ ; les autres pylônes étaient en ligne droite. La

portée pour l'essai, entre les pylônes S et T, était de 342 m; les portées R...S et T...U étaient de 328 m, respectivement de 283 m. Les pylônes S et T étaient équipés de chaînes normales de semi-ancrage, qui, selon la nature de l'essai envisagé sur le câble intéressé, furent laissées en place ou remplacées par d'autres. Les pylônes R et U comportaient des chaînes de suspension, qui restèrent identiques pendant tous les essais.

Les premiers essais — exécutés avec une seule charge appliquée au milieu de la portée S...T — eurent surtout un caractère d'orientation; quelques résultats particuliers sont indiqués plus loin. Pour les autres essais, on chargea un des câbles de la portée S...T en 7 points différents. Ainsi, on se rapprocha d'une surcharge uniformément répartie par unité de longueur. Par conséquent, la courbe prise par le câble chargé ne différa pas beaucoup d'une parabole. Le comportement du câble fut examiné dans les conditions suivantes:

1. chaînes de suspension aux pylônes S et T; poids de 116 kg (suspension et dispositif de déclenchement compris) à chacun des 7 points de chargement, ce qui correspond à une surcharge uniformément répartie de 2,38 kg/m;
2. chaînes de semi-ancrage aux pylônes S et T; poids de 150 kg à chacun des 7 points de chargement, correspondant à 3,08 kg/m;
3. ancrages aux pylônes S et T; poids de 150 kg à chacun des 7 points de chargement, correspondant à 3,08 kg/m.

En chaque point de chargement, le câble resta toutefois soumis à une surcharge résiduelle de 6 kg due à la pince de suspension et à la tige de l'appareil déclencheur, cette surcharge étant égale à 0,12 kg/m en moyenne. Le câble soumis à l'essai présentait donc une flèche un peu plus grande que celle des câbles sans aucune surcharge.

Dans tous les essais, les poids des 7 points de chargement furent déclenchés simultanément sauf inexactitudes d'exécution. On ne fit pas d'essais systématiques de libération différée des 7 points de chargement; on constata, toutefois, l'effet de déclenchements retardés involontairement (fig. 15).

Les figures 4, 5 et 6 reproduisent les dessins superposés d'agrandissements d'images pris avec l'appareil cinématographique I, qui devait enregistrer les mouvements verticaux. Les figures 7, 8 et 9 représentent leur transformation en projection orthogonale; les figures 10 et 11 reproduisent sous

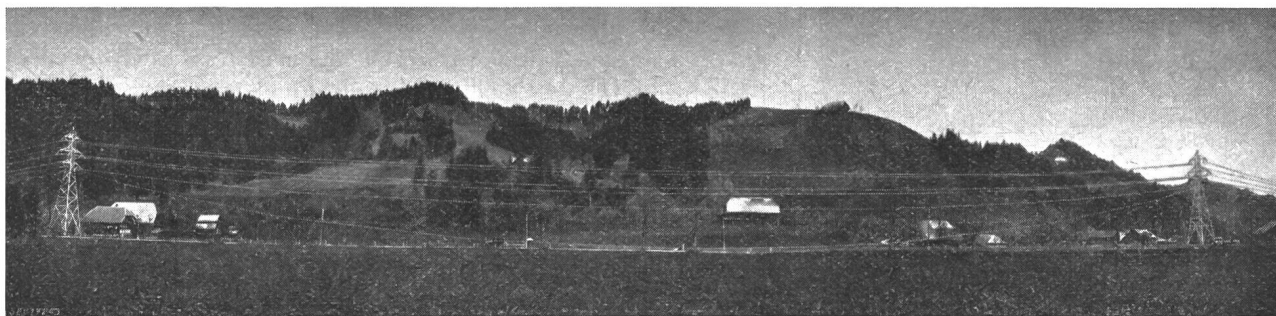


Fig. 3

Le premier tronçon soumis aux essais

A gauche le pylône S, à droite le pylône T; 6 câbles (mis en évidence par retouche) et 1 câble de terre. Le câble n° 3 — avec chaînes de suspension aux pylônes S et T — est chargé en 7 points par des poids de 116 kg; les portées adjacentes ne sont pas chargées.

forme de dessin les photographies des chaînes d'isolateurs.

Les figures 12, 13, 14 et 15 montrent la trajectoire dans le temps des oscillations verticales au milieu de la portée  $S...T$ , à partir des prises de vue cinématographiques.

Lors des essais décrits, effectués sur la portée  $S...T$ , à laquelle se rattachaient des portées adjacentes exemptes d'angle de ligne, le câble déchargé oscillait pratiquement dans un plan vertical, quand les pylônes  $S$  et  $T$  étaient équipés de chaînes de suspension ou de semi-ancrage.

Dans le cas où la ligne fait un angle et où les chaînes de suspension et de semi-ancrage sont tirées latéralement en position inclinée, les points de suspension du câble décrivent des mouvements latéraux sous l'influence de la charge et de la décharge. Dans le cas d'une décharge subite, le câble est soumis à des oscillations latérales le long de toute la portée. Des essais faits dans la portée  $E...F$  d'un second tronçon d'essai (voir fig. 16) le confirmèrent. Les pylônes  $D$ ,  $E$  et  $G$  étaient pourvus de chaînes de suspension et le pylône  $F$  de chaînes de semi-ancrage, qui, pour un essai sur un des câbles, furent remplacées par une chaîne de suspension. A cause de la surélévation du pylône  $G$ , les chaînes d'isolateurs du pylône  $F$  furent soumises à une charge verticale relativement faible et furent donc projetées latéralement davantage par la traction angulaire.

Un câble de la portée  $E...F$  de 266 m fut chargé en 7 points, chacun avec 150 kg correspondant à 3,95 kg/m. Après décharge, le câble resta soumis en chacun de ces points à une surcharge de 6 kg correspondant à 0,16 kg/m. Les trajectoires du milieu du câble de la portée  $E...F$ , obtenues par des prises de vue cinématographiques, sont reproduites aux figures 17 et 18; la figure 19 montre schématiquement la chaîne de suspension du pylône  $F$  en trois positions caractéristiques.

Des trajectoires semblables furent obtenues lorsqu'on imita dans un essai l'action du vent dans la

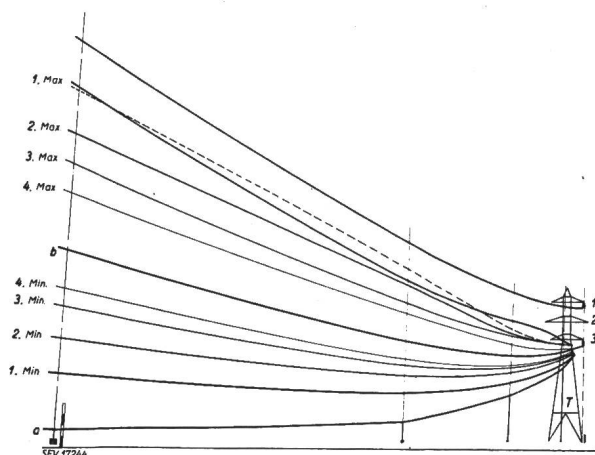


Fig. 4

Câble n° 3 avec chaînes de suspension aux pylônes  $S$  et  $T$ , chargé en 7 points par des poids de 116 kg, correspondant à 2,38 kg/m

----- Environ 1 s avant le premier maximum au milieu de la portée (1. Max.); voir figure 12

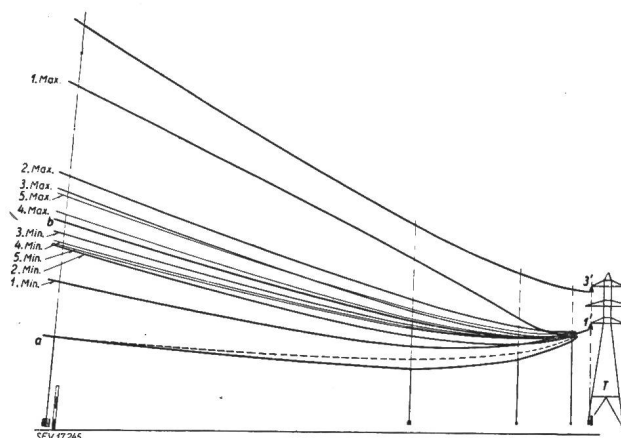


Fig. 5

Câble n° 1' avec semi-ancrages aux pylônes  $S$  et  $T$ , chargé en 7 points par des poids de 150 kg, correspondant à 3,08 kg/m. Le déclenchement du poids situé au milieu de la portée a été retardé de  $\frac{1}{10}$  s

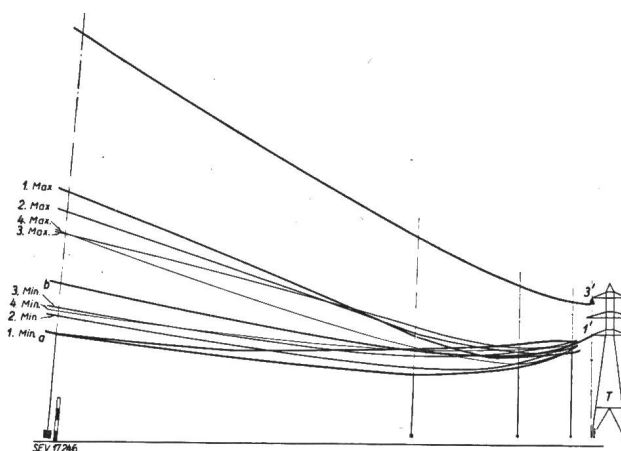


Fig. 6

Câble n° 1' avec ancrages aux pylônes  $S$  et  $T$ , chargé en 7 points par des poids de 150 kg, correspondant à 3,08 kg/m

Fig. 4, 5 et 6

Dessins superposés d'agrandissements de prises de vue exécutées avec l'appareil cinématographique I qui enregistra les mouvements verticaux du câble oscillant

A gauche: ligne en traits-points: milieu de la portée  $S...T$

A droite: pylône  $T$ ; chiffres au pylône:  $\begin{Bmatrix} 3' & 1 \\ 2' & 2 \\ 1' & 3 \end{Bmatrix}$  numération des câbles

a position initiale, câble chargé avec des poids

1. Max.: position la plus élevée atteinte par le câble au milieu de la portée, après la décharge

1. Min.: position la plus basse après le premier maximum au milieu de la portée

2. Max.: deuxième position maximum au milieu de la portée, etc.

b position de repos après le déclin des oscillations du câble; surcharge résiduelle  $7 \times 6$  kg, correspondant à 0,12 kg/m

portée  $S...T$  (où un effort d'angle n'existait pas), voir fig. 20.

Les essais spéciaux avec les semi-ancrages ont été décrits à part; voir référence bibliographique <sup>1)</sup>.

### Résultats des essais

Le calcul des flèches et des hauteurs de rebondissement, ainsi que leur comparaison avec les valeurs mesurées, avaient comme but principal d'établir et de contrôler une méthode de calcul qui puisse être appliquée à d'autres portées, à d'autres câbles, à d'autres charges et décharges, etc. Plutôt



qu'une méthode scientifiquement exacte et mathématiquement élégante, on s'efforça d'établir une méthode compréhensible et claire pour les constructeurs de lignes, si possible simple, mais suffisante pour les besoins de la pratique.

**A. Flèche d'un câble chargé seulement dans une portée; comparaison entre les flèches mesurée et calculée**

Les figures 7, 8 et 9 montrent l'influence des divers types de suspension du câble. Il y a lieu toutefois de considérer que pour l'essai avec les chaînes de suspension (fig. 7) la surcharge était plus faible que pour l'essai avec semi-ancrage et ancrage.

I) Calcul de la flèche de la portée  $S...T$  avec chaînes de suspension aux pylônes  $S$  et  $T$ .

Données:

portée:  $a_1 = 342$  m;  
câble: aluminium-acier ( $170,5 \text{ mm}^2 \text{ Al} + 39,8 \text{ mm}^2 \text{ ac.}$ ),  
poids  $0,810 \text{ kg/m}$ ,  
module d'élasticité  $E = 755\,000 \text{ kg/cm}^2$ ;  
surcharge dans la portée  $S...T$ :  $7 \times 116 \text{ kg}$ , correspondant à  $2,38 \text{ kg/m}$ .

Si le câble avait été chargé de la même façon par unité de longueur non seulement dans la portée  $S...T$ , mais aussi dans les autres portées comprises entre les deux ancrages les plus proches, la flèche du câble chargé aurait pu être calculée d'après les méthodes usuelles <sup>6)</sup> en partant de la flèche du câble déchargé ( $f_1 = 11,30 \text{ m}$ ). Dans ce cas, on aurait eu  $f_1 = 13,8 \text{ m}$ , pour une tension horizontale de  $p_1 = 1605 \text{ kg/cm}^2$ .

Puisque le câble était uniquement chargé dans la portée  $S...T$ , les chaînes d'isolateurs se déplacèrent dans la direction de la ligne <sup>7)</sup>, <sup>8)</sup>; voir les figures 7, 10 et 21.

Pour une parabole, on peut appliquer par approximation les formules suivantes:

$$\text{longueur du câble: } l_1 = a_1 + \frac{8}{3} \frac{f_1^2}{a_1}$$

$$l_2 = a_2 + \frac{8}{3} \frac{f_2^2}{a_2}, \text{ d'où on peut calculer } f_2.$$

En première approximation, on peut mettre  $l_2 = l_1$ ; pour un calcul plus exact, on doit, toutefois, considérer la diminution de longueur du câble due à l'élasticité, qui correspond à  $a_2 < a_1$  et  $f_2 > f_1$ .

$$l_2 = l_1 \left( 1 + \frac{p_2 - p_1}{E} \right)$$

Donc, en tenant compte des déviations des chaînes d'isolateurs aux pylônes  $S$  et  $T$  ( $\delta_{as} =$

<sup>6)</sup> E. Maurer, Le calcul mécanique des lignes aériennes. Bull. SEV 1936, n° 2, p. 41; n° 3, p. 65.

<sup>7)</sup> H. Bourquin, Influence de la déviation des chaînes d'isolateurs sur la variation de flèche des lignes aériennes suspendues. Bull. SEV (1923), n° 10, p. 545.

<sup>8)</sup> K. Langhard, Der Einfluss ungleichmässig verteilter Zusatzlasten auf die Durchhänge von Freileitungen. Elektrotechn. Z. 1929, n° 46, p. 1647.

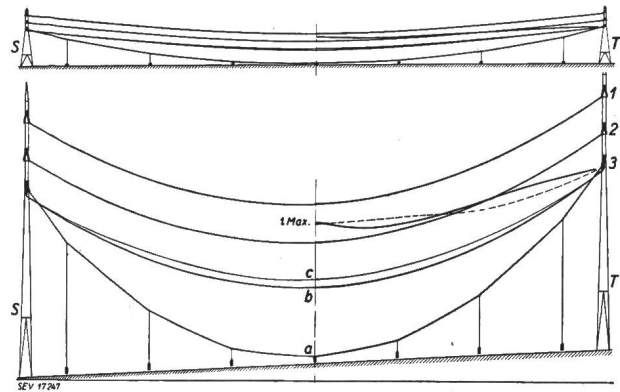


Fig. 7

Câble n° 3 avec chaînes de suspension aux pylônes  $S$  et  $T$ , chargé en 7 points par des poids de  $116 \text{ kg}$ , correspondant à  $2,38 \text{ kg/m}$

La figure est tirée de la figure 4 et redessinée en projection orthogonale

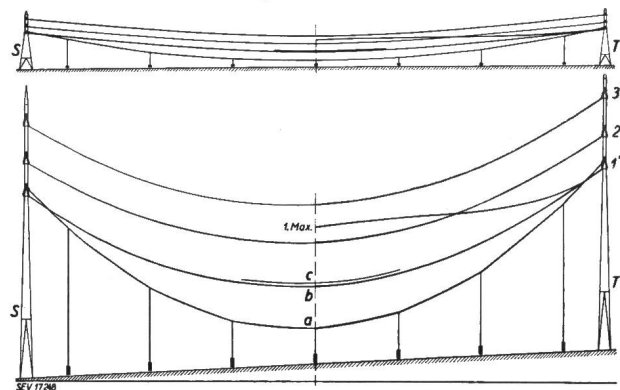


Fig. 8

Câble n° 1' avec semi-ancrages aux pylônes  $S$  et  $T$ , chargé en 7 points par des poids de  $150 \text{ kg}$ , correspondant à  $3,08 \text{ kg/m}$

La figure est tirée de la figure 5 et redessinée en projection orthogonale

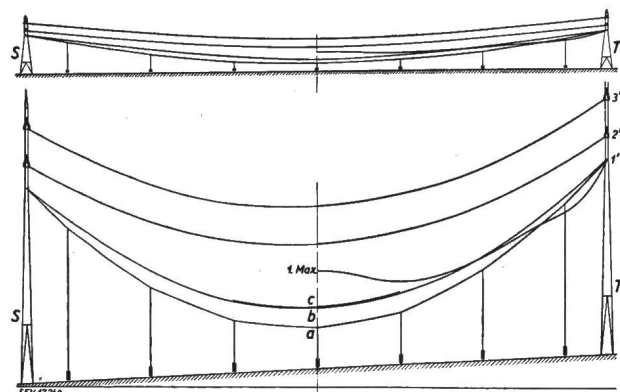


Fig. 9

Câble n° 1' avec ancrages aux pylônes  $S$  et  $T$ ; chargé en 7 points par des poids de  $150 \text{ kg}$ , correspondant à  $3,08 \text{ kg/m}$

La figure est tirée de la figure 6 et redessinée en projection orthogonale

(Par suite d'une inadvertance pendant le réglage du câble, la flèche du câble déchargé est plus grande que dans le cas des figures 7 et 8)

Fig. 7, 8 et 9

a position initiale, câble chargé avec des poids  
1. Max.: position la plus élevée atteinte par le câble au milieu de la portée, après la décharge

b position de repos du câble déchargé après le déclin des oscillations; surcharge résiduelle  $7 \times 6 \text{ kg}$ , correspondant à  $0,12 \text{ kg/m}$

c position de repos que prendrait le câble exempt de toute surcharge

Echelle des longueurs:  $1 : 4500$

Echelle des hauteurs:  $1 : 4500$  en haut,  $1 : 900$  en bas

1,09 m;  $\delta_{aT} = 1,06$  m), on calcula  $f_2 = 20,7$  m. Cette valeur est égale à la flèche mesurée.

Si les déviations  $\delta_{aS}$  et  $\delta_{aT}$  n'avaient pas été connues, on les aurait d'abord estimées et ensuite étendu les calculs aux portées qui auraient pu être encore influencées par la surcharge de la portée S...T.

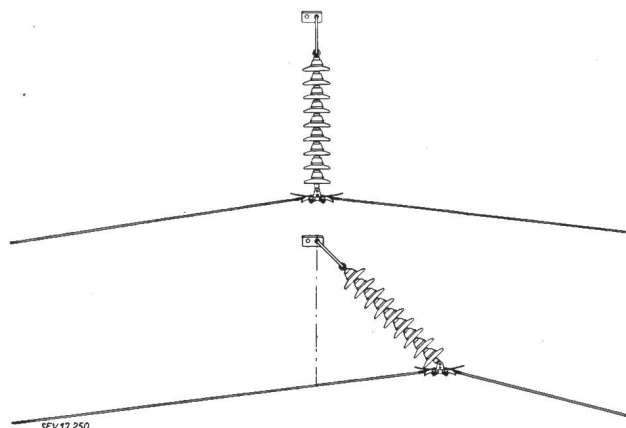


Fig. 10

Chaîne de suspension au pylône S, correspondant à la figure 7

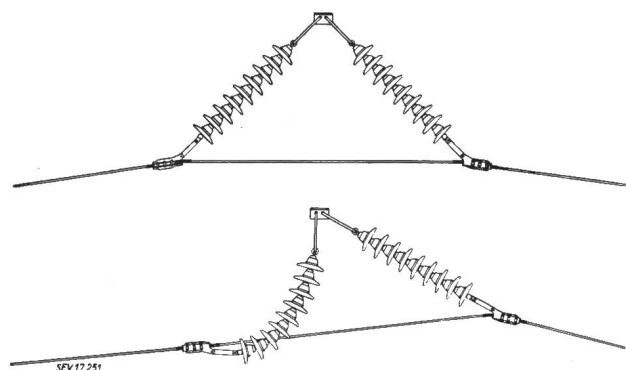


Fig. 11

Chaines de semi-ancrage au pylône S, correspondant à la figure 8

Fig. 10 et 11

En bas: câble chargé dans la portée S...T

En haut: position de repos du câble après la décharge

## II) Calcul de la flèche dans la portée S...T avec des chaînes de semi-ancrage aux pylônes S et T.

Données:

surcharge dans la portée S...T;  $7 \times 150$  kg, correspondant à 3,08 kg/m; autres données comme pour I).

La flèche fut calculée comme décrit sous I). Avec les déviations observées  $\delta_{aS} = \delta_{aT} = 0,44$  m, on calcula  $f_2 = 17,8$  m, valeur égale à la flèche mesurée.

## III) Calcul de la flèche dans la portée S...T avec ancrages aux pylônes S et T.

Données comme pour II).

En supposant immobiles les points d'ancrage, on calcula une flèche de 17,6 m, tandis que la valeur mesurée fut de 17,9 m. La différence de 0,3 m s'explique par un déplacement élastique des extrémités des traverses de 5 cm environ.

La figure 22 représente, pour la portée S...T de 342 m de longueur, les augmentations de la flèche sous l'action de surcharges de 0...4 kg/m par rapport au câble complètement exempt de toute surcharge. Les courbes I et II pour les chaînes de suspension et de semi-ancrage ne sont pas sans autre applicables à chaque portée de 342 m, car la mobilité de ces chaînes dépend aussi des portées adjacentes et du mode de suspension du câble aux pylônes correspondants.

Pour montrer l'influence du mode de suspension du câble, on indiquera encore ci-dessous les augmentations des flèches mesurées pendant les essais préliminaires, avec une seule charge appliquée au milieu de la portée S...T:

Mode de suspension du câble aux pylônes S et T	Charge kg	Augmentation de la flèche au point d'application de la charge m
Chaînes de suspension	220	9,2
Semi-ancrages	220	5,5
Semi-ancrages	560	8,3

## B. Oscillations verticales du câble

Lors des essais poursuivis sur la portée S...T, représentés dans les fig. 4 et 7 (chaînes de suspension aux pylônes S et T) et 5 et 8 (semi-ancrages), le câble déchargé oscillait pratiquement dans un plan vertical; le câble ancré (fig. 6 et 9) oscillait par contre dans un espace, d'une largeur de 0,5 m environ au milieu de la portée. La comparaison des figures 12 à 15 montre que pour divers types de suspension du câble, les amplitudes non seulement furent différentes, mais aussi le caractère et la durée des oscillations.

Il est particulièrement intéressant de pouvoir calculer la hauteur maximum qu'un câble oscillant peut atteindre au milieu de la portée. Comme indiqué plus bas, cette hauteur  $z_1$  au-dessus de la position de repos, ne dépend pas uniquement de l'abaissement  $y_a$  (dû à la surcharge) du sommet de la courbe du câble; les valeurs  $z_1/y_a$ , calculées à partir des essais décrits, ne peuvent donc pas être appliquées sans autre à des conditions différentes.

Dans tous les cas étudiés, on a admis que les surcharges réparties uniformément le long de la portée S...T étaient détachées simultanément et de façon uniforme.

Dans le calcul de la hauteur de rebondissement avec chaînes de suspension et de semi-ancrage aux pylônes S et T, on fit pour la position la plus élevée du câble oscillant les suppositions simplificatrices suivantes, bien qu'elles ne correspondent pas exactement à la réalité:

le câble a la forme d'une parabole à axe vertical;

l'effort de traction est à peu près égal à celui correspondant à la position de repos après la décharge et la différence est à négliger;

dans les portées adjacentes, dans lesquelles le câble déchargé oscille aussi, on peut négliger la différence momentanée qui existe entre l'énergie mécanique et celle correspondant à la position de repos après la décharge dans la portée S...T.

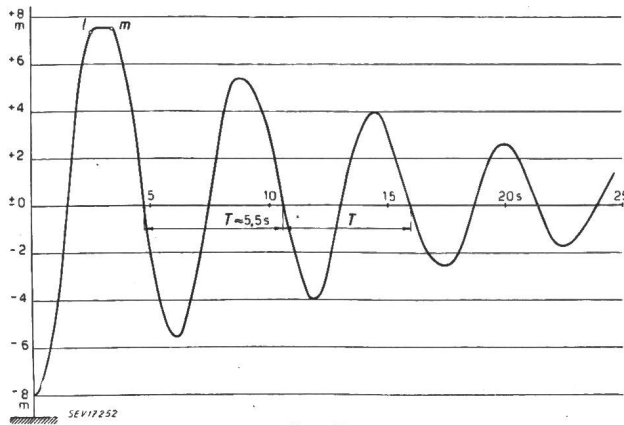


Fig. 12

Chaines de suspension aux pylônes S et T, se rapportant aux figures 4 et 7  
 l correspond à la ligne à tirets — des figures 4 et 7  
 m correspond au premier maximum (1. Max.) des figures 4 et 7

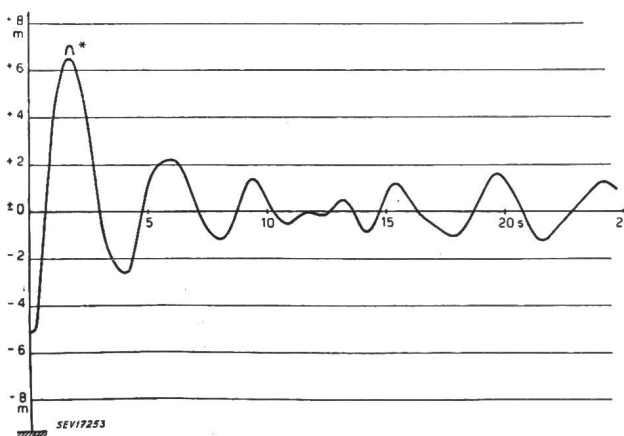


Fig. 13

Semi-ancrages aux pylônes S et T, se rapportant aux figures 5 et 8  
 \* hauteur de rebondissement à la répétition de l'essai avec déclenchement simultané des poids

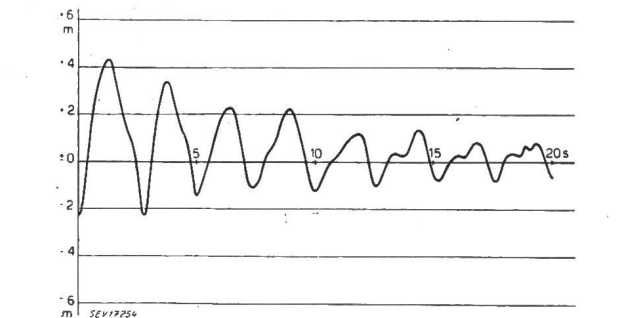


Fig. 14

Ancrages aux pylônes S et T, se rapportant aux figures 6 et 9

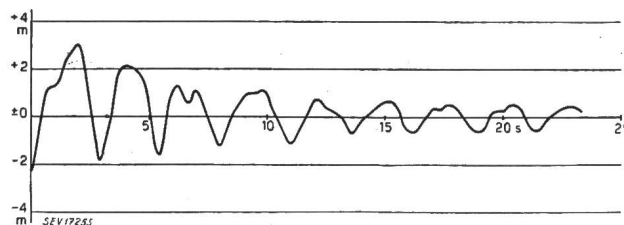


Fig. 15

Ancrages aux pylônes S et T

Le déclenchement du poids au cinquième point de chargement a été retardé de 0,4 s

Fig. 12, 13, 14 et 15

Oscillations verticales au milieu de la portée S...T  
 Abscisses: temps en s après la décharge du câble  
 Ordonnées: distance du câble de sa position de repos après la décharge

### On néglige également :

les variations de hauteur des points de suspension pour les positions correspondant au câble chargé et déchargé dans la portée S...T, ainsi que l'influence du frottement.

Sur la base de ces hypothèses on peut faire le raisonnement suivant :

L'augmentation de la surcharge de  $q_b$  à  $q_a$  fournit au conducteur un travail mécanique qui est emmagasiné dans le câble tendu, comme dans un ressort, sous forme d'énergie potentielle et cela non seulement dans la portée chargée S...T. Cette énergie, libérée après le détachement de la surcharge, se

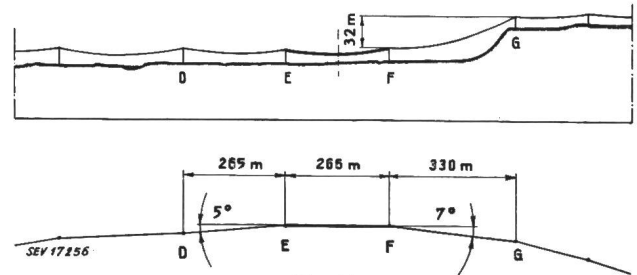


Fig. 16

Profil longitudinal schématique et plan de situation du second tronçon soumis aux essais  
 Chargement d'un câble dans la portée E...F avec  $7 \times 150$  kg, correspondant à  $3,95$  kg/m; surcharge résiduelle après la décharge  $7 \times 6$  kg, correspondant à  $0,16$  kg/m

transforme en énergie cinétique et énergie potentielle. Lorsque le câble oscillant atteint sa position la plus élevée, son énergie cinétique est égale à zéro et son énergie potentielle, rapportée à la position de repos du câble déchargé, est alors égale au travail  $A_a$  fourni par les surcharges. Le calcul peut être limité à 1 m de câble au centre de la portée.

Dans la figure 23 l'aire hachurée représente le travail  $A_a = \int_0^{y_a} \Delta q \cdot dy$  que la surcharge produit sur

1 m de câble au milieu de la portée, lorsqu'elle croît de  $q_b$  à  $q_a$ . En négligeant, comme il est indiqué plus haut, le déplacement de la droite passant par les points de suspension du câble, on peut mettre  $dy = df$ , où  $f$  = flèche se rapportant à la dite droite. La courbe  $(y, \Delta q)$  de la figure 23 est donc une partie de la courbe  $(\Delta f, q)$  de la figure 22 pour la suspension correspondante du câble. Soit  $G$  le poids par mètre du câble déchargé (y compris une éventuelle surcharge résiduelle du câble). L'énergie potentielle  $Gz_1$ , par rapport à la position de repos après décharge, est égale au travail  $A_a$ ; on peut en déduire l'amplitude maximum  $z_1 = A_a/G$  au-dessus de la position de repos après la décharge.

Suivant cette méthode, on calcula, pour la portée S...T, les positions les plus élevées correspondant aux conditions des essais du câble oscillant pour chaînes de suspension et de semi-ancrage (voir tableau I). Si l'on considère les simplifications admises pour le calcul, on trouvera que les différences entre les valeurs calculées et mesurées sont faibles. Des calculs semblables pour la portée E...F (fig. 16...18) donnèrent également une concordance satisfaisante entre les hauteurs de rebondissement

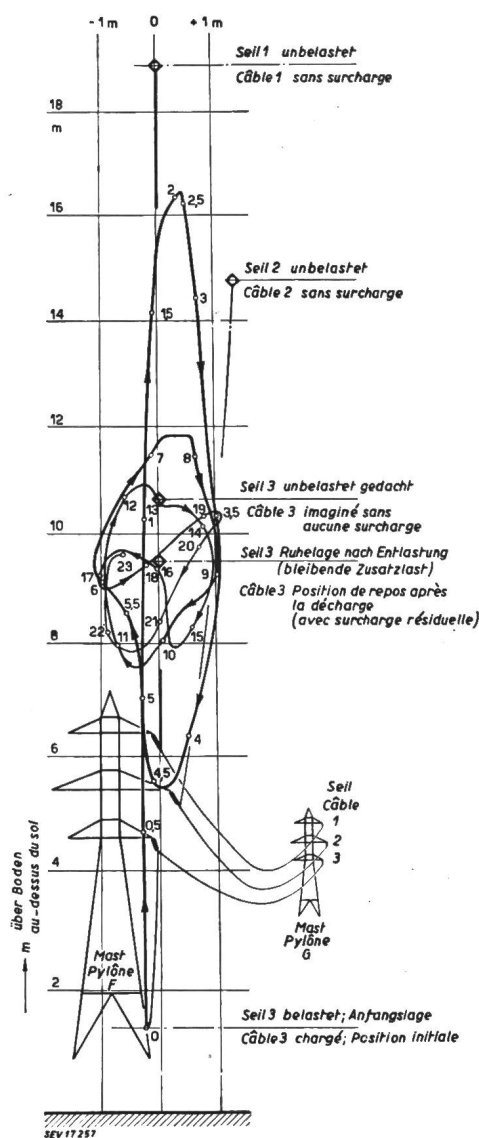


Fig. 17

Câble à l'essai suspendu aux pylônes E et F par des chaînes de suspension

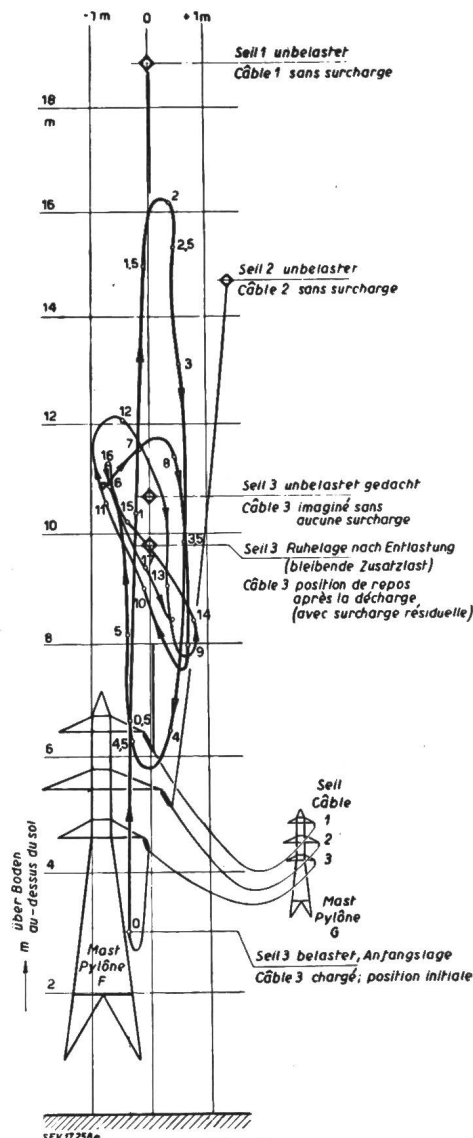


Fig. 18

Chaînes de semi-ancrage au pylône F, chaîne de suspension au pylône E inchangée, d'où une diminution relativement faible de la flèche par rapport à la figure 17

Fig. 17 et 18

Dessins d'agrandissements d'images extraites du film pris au moyen de l'appareil cinématographique II placé en-dessous du câble, vers le pylône F

Trajectoire parcouru par le câble au milieu de la portée E...F après la décharge. Les chiffres reportés le long de la courbe de la trajectoire indiquent le temps en secondes qui s'est écoulé après la décharge. Les points  $\diamond$  des câbles 1, 2 et 3 se trouvent également au milieu de la portée

calculées et mesurées. La méthode de calcul décrite peut donc suffire pour les conditions pratiques, où les incertitudes relatives à la grandeur, à la répartition et au détachement des surcharges sont bien plus grandes que les inexactitudes du calcul des hauteurs de rebondissement.

Pour le câble ancré aux pylônes S et T, on calcula un peu différemment. On admit que les points d'ancrage étaient parfaitement immobiles. Dans ces conditions les portées adjacentes n'exercèrent aucun effort de traction sur le câble rebondissant, qui se détendit complètement; l'énergie mécanique libérée augmenta la hauteur de rebondissement, voir fig. 24. La hauteur  $z_1$  calculée de cette façon, se trouva environ 20% plus petite que la hauteur mesu-

rée. Même en tenant compte du déplacement élastique des points d'ancrage, la hauteur calculée serait dans tous les cas encore inférieure à celle qu'on a mesurée. La figure 9 peut expliquer ce fait; le câble, dans sa position la plus élevée, ne prit, même pas approximativement, la forme parabolique. Dans le voisinage du pylône T, le câble atteignit même une position extrême plus basse que celle qu'il occupait sous l'action de la surcharge (fait dont on doit tenir compte dans la pratique, par exemple dans les croisements de lignes). Pour les calculs pratiques, il suffit donc d'appliquer la méthode simplifiée décrite ci-dessus et d'ajouter aux valeurs  $z_1$  ainsi calculées environ 25% pour des conditions analogues à celles de l'essai décrit.

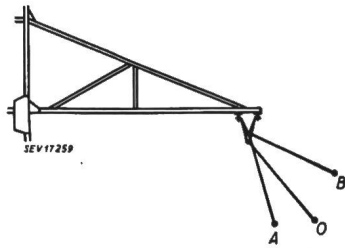


Fig. 19

Chaîne d'isolateurs tirée latéralement en position inclinée par traction angulaire

- O position de repos; câble sans surcharge
- A position de repos; câble chargé dans la portée située au devant du pylône
- B position la plus haute atteinte par la chaîne après la décharge du câble

A se trouve devant, B derrière le plan passant par O et l'axe du pylône

Calcul des positions les plus élevées du câble oscillant dans la portée S...T ( $a = 342$  m)

Comparaison avec les valeurs mesurées

Tableau I

Type de suspension aux pylônes S et T	Chaînes de suspension	Chaînes de semi-ancrage	
Surcharge par m de câble chargé dans la portée S...T $q_a$	2,38	3,08	kg/m
Surcharge du câble déchargé $q_b$	0,12	0,12	kg/m
Surcharge libérée à la décharge $(q_a - q_b) = \Delta q_a$	2,26	2,96	kg/m
Poids du câble déchargé (surcharge résiduelle $q_b$ comprise) $G$	0,93	0,93	kg/m
Flèche calculée du câble chargé avec $q_a$ , égale à la flèche mesurée $f_a$	20,7	17,8	m
Flèche mesurée du câble déchargé, avec surcharge permanente $q_b$ (même valeur pour les semi-ancrages que pour les chaînes de suspension à cause de la température plus élevée) $f_b$	12,2	12,2	m
Augmentation de la flèche en raison de l'augmentation de la surcharge, de $q_b$ à $q_a$ ( $f_a - f_b$ )	8,5	5,6	m
Travail sur 1 m de câble au milieu de la portée $\int_0^{f_a} \Delta q \cdot dy = \int_{f_b}^{f_a} \Delta q \cdot df = A_a$	7,17	6,35	mkg/m
Position maximum calculée du câble oscillant, déchargé de $q_a$ à $q_b$ , par rapport à la position de repos du câble déchargé $z_1$	7,7	6,8	m
Position maximum mesurée $z_1^*$	7,5	7,0	m

Pour pouvoir comparer l'influence des chaînes de suspension, des semi-ancrages et des ancrages sur la hauteur de rebondissement, on calcula les valeurs indiquées ci-dessus pour le même effort du câble exempt de toute surcharge, ainsi que pour la même surcharge, voir tableau II. Les valeurs calculées  $z_1/f_a$  ne peuvent pas être appliquées sans autre à des conditions différentes.

Les flèches et les hauteurs de rebondissement, représentées dans les figures et dans les tableaux qui précèdent, sont tellement grandes, qu'un juge-

ment superficiel pourrait conduire à la conclusion que la sécurité d'exploitation est insuffisante, tant pour la ligne soumise aux essais que pour d'autres lignes similaires.

On jugera autrement, si l'on tient compte de la possibilité et de la probabilité de dérangements que pourraient provoquer des câbles chargés et des câbles déchargés en oscillation, de la longueur des portées, ainsi que de l'importance des surcharges,

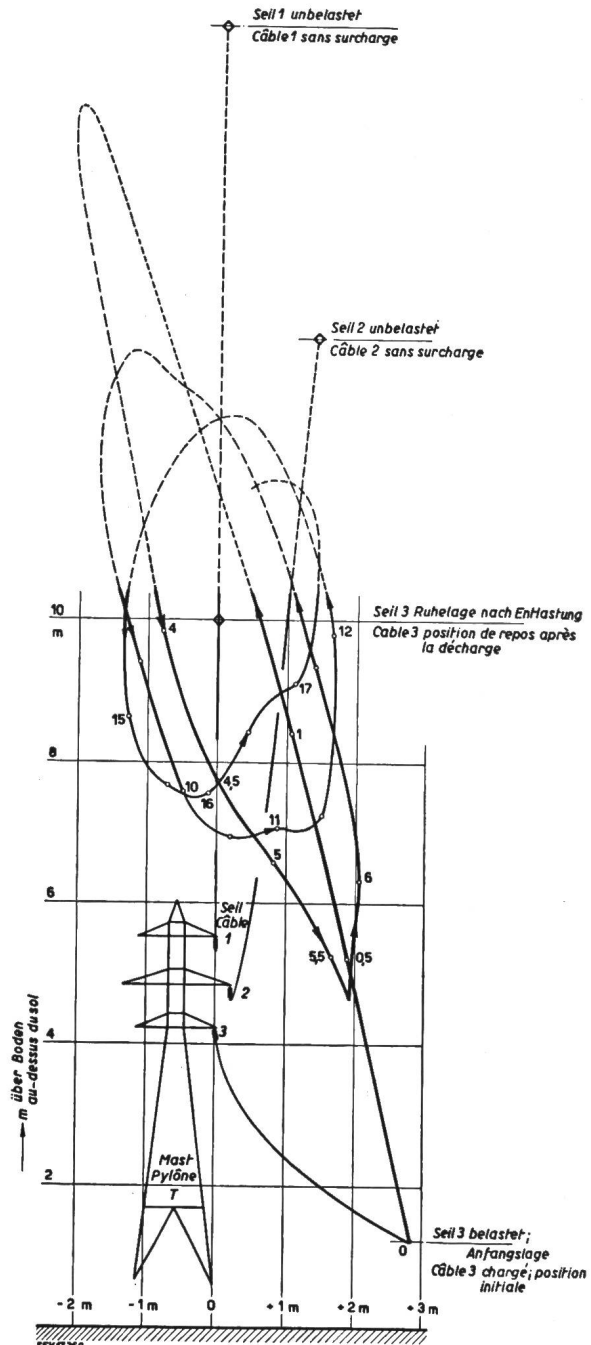


Fig. 20

Câble chargé seulement au milieu de la portée S...T longue de 342 m; poids déplacé horizontalement de 3 m par rapport au plan normal de la flèche, dans le but d'imiter l'action du vent. Trajectoire parcourue par le câble déchargé au milieu de la portée; lignes pleines = dessins d'agrandissements d'images cinématographiques de la caméra II; lignes complémentaires à tirets suivant des images cinématographiques de la caméra I



Influence du type de suspension du câble aux pylônes S et T sur l'augmentation de la flèche et sur la hauteur de rebondissement dans la portée S...T

Tableau II

Type de suspension aux pylônes S et T	Chaînes de suspension m	Semi-ancrages m	Ancrages m
Augmentation de la flèche due à l'augmentation de la surcharge de 0,12...3,08 kg/m $\Delta f_a$	9,5	5,6*	3,3**
Position maximum du câble oscillant, déchargé à 0,12 kg/m, par rapport à la position de repos du câble déchargé $z_1$	9,7	7,0*	6,0
Rapport $z_1/f_a$ , environ	1,0	1,25	1,8

\*) Valeurs mesurées; les autres valeurs de  $\Delta f_a$  et de  $z_1$  sont calculées.  
\*\*) Le déplacement élastique des extrémités des traverses est considéré.

surtout de leur répartition et de la manière dont elles sont détachées. Les figures 13 et 15 montrent que la hauteur de rebondissement est déjà bien plus faible si, par endroits, la surcharge est détachée avec un peu de retard. Une chute subite de toute la surcharge répartie uniformément, qui porterait à la hauteur maximum de rebondissement, est très peu probable. Les figures 24 et 25 montrent qu'une surcharge résiduelle diminue considérablement la hauteur de rebondissement.

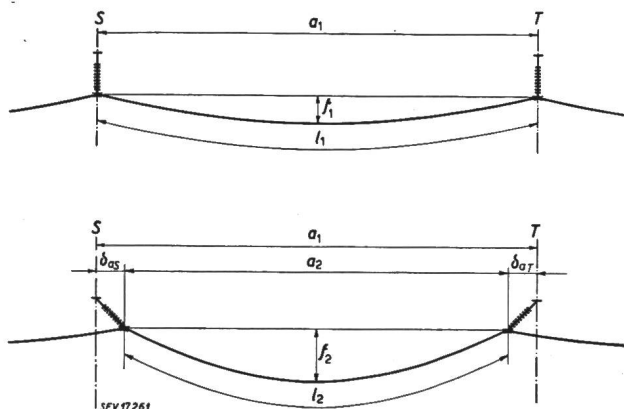


Fig. 21

Représentation schématique des flèches de la portée S...T  
En haut: surcharge uniforme sur toutes les portées  
En bas: même surcharge, mais uniquement dans la portée S...T; chaînes d'isolateurs déviées dans la direction de la ligne  
 $a_2 = a_1 - (\delta_{as} + \delta_{at})$   
Longueur du câble  $l_2 < l_1$

### C. Oscillations latérales d'un câble subitement déchargé

Les oscillations latérales d'un conducteur dues à un effort d'angle ne peuvent pas être calculées à l'avance comme les oscillations verticales; les essais représentés aux figures 17 et 18 ne permettent pas non plus de tirer des valeurs valables en général; ces essais montrent, toutefois, que les oscillations latérales sont plus fortes dans la portée que les mouvements latéraux des points de suspension du câble. Les observations faites plus haut, relatives à la probabilité de dérangements de service s'ap-

pliquent aussi, d'une manière analogue, aux oscillations latérales du câble brusquement déchargé.

L'essai représenté à la figure 20 réalisa seulement une imitation grossière des conditions effectives

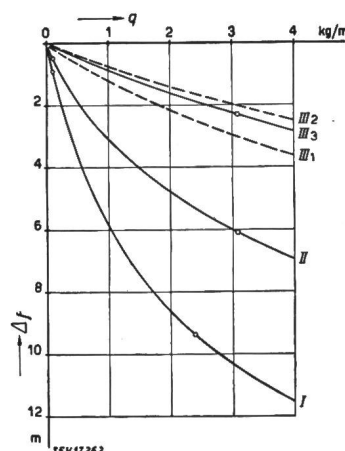


Fig. 22

Portée S...T ( $a = 342$  m) avec surcharge de 0...4 kg/m; les autres portées sans surcharge. Augmentation de la flèche par rapport au câble sans aucune surcharge

Abscisses: surcharge en kg/m

Ordonnées: augmentation de la flèche en m

I chaînes de suspension aux pylônes S et T

II chaînes de semi-ancrage aux pylônes S et T

III1 ancrages aux pylônes S et T

Les courbes I, II et III1 sont valables pour le câble aluminium-acier (170,5 + 39,8) mm<sup>2</sup> tendu normalement, correspondant à une traction horizontale de 3100 kg à 0 °C et 2 kg/m de surcharge

III1 s'applique à des points d'ancrage immobiles, respectivement à des surcharges uniformes dans toutes les portées

III2 s'applique à l'essai avec la traction moindre du câble et à des points d'ancrage immobiles

III3 calculée en considérant que les extrémités des traverses cèdent élastiquement

o augmentations mesurées des flèches

sous l'action d'une surcharge et du vent; il y a toutefois lieu de s'attendre que, lorsque la surcharge de givre tombe subitement d'un câble dévié latéralement, ce dernier oscille à peu près comme indiqué à la fig. 20. Des observations sur de telles libérations de la surcharge et de leurs conséquences sont rares; l'auteur connaît, toutefois, un cas où le câble rebondissant toucha le câble de terre et les

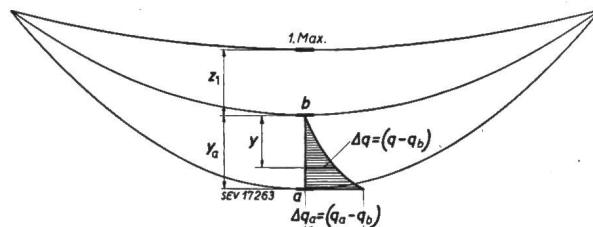


Fig. 23

Travail de la surcharge, augmentant de  $q_b$  à  $q_a$  sur 1 m de câble au milieu de la portée

Ce travail est indiqué par l'aire hachurée

$$A_a = \int_0^{y_a} \Delta q \cdot dy$$

a câble avec une surcharge  $q_a$  kg/m

1. Max.: câble déchargé dans sa position la plus élevée

( $y_a + z_1$ ) hauteur de rebondissement

b position de repos après le déclin des oscillations du câble surcharge résiduelle =  $q_b$  kg/m

poids du câble déchargé (surcharge  $q_b$  comprise) = G

cylindres de givre retrouvés dans la neige montrèrent que la surcharge était effectivement tombée du câble dévié latéralement par le vent.

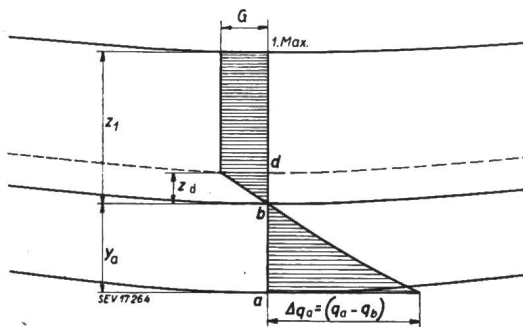


Fig. 24

Détermination de la hauteur de rebondissement ( $y_a + z_1$ ) pour un câble ancré en des points immobiles

- a câble avec une surcharge  $q_a$  kg/m  
 1. Max.: câble déchargé dans sa position la plus élevée  
 b position de repos après le déclin des oscillations du câble; surcharge résiduelle  $q_b$  kg/m  
 poids du câble déchargé  $G$

Au-dessus de d le câble n'est plus soumis à la traction (Dans l'essai, représenté par la figure 9, la différence entre b et d était de 0,8 m)

Le travail de la surcharge est représenté par l'aire hachurée inférieure:

$$A_a = \int_0^{y_a} \Delta q \cdot dy$$

Le travail nécessaire pour soulever le câble de sa position de repos b à la position la plus élevée (1. Max.) est représentée par l'aire hachurée supérieure:

$$A_1 \approx \frac{G}{2} \cdot z_d + G(z_1 - z_d) = G\left(z_1 - \frac{z_d}{2}\right)$$

$A_1 = A_a$ , d'où on peut tirer la hauteur  $z_1$

### Applications pratiques des résultats des essais

Les Forces Motrices Bernoises S. A. utilisèrent pratiquement pour la première fois les connaissances acquises par les essais, lorsqu'elles décidèrent, en 1930, de transformer le tronçon le plus menacé par le givre de la ligne à 150 kV Innertkirchen-Bickigen<sup>3)</sup>. Elles substituèrent toute une série de pylônes à six conducteurs par des groupes de pylônes à deux conducteurs. Dans les autres tronçons de la ligne, elles augmentèrent la sécurité d'exploitation des grandes portées par le montage de suspensions dites à triangle, ainsi que de semi-ancrages usuels et à trapèze<sup>1)</sup>; dans quelques cas, on allongea les traverses médianes, tout en renforçant convenablement les pylônes.

Sur la base des résultats de ces essais, on situa — en considérant la portée — les zones qui, par suite des oscillations des conducteurs se produisant lors du détachement des surcharges, pouvaient être envisagées comme dangereuses. On tint compte, dans les suppositions relatives à la charge et à la décharge, des conditions locales dues au givre, à la neige et au vent.

Pour le projet des pylônes de la ligne à 150 kV Innertkirchen-Wimmis-Mühleberg<sup>3)</sup>, les Forces Motrices Bernoises S. A. se basèrent sur les expériences faites sur la ligne à 150 kV Innertkirchen-Bickigen, ainsi que sur les essais de 1930; les dis-

tances entre les phases furent en général augmentées par rapport à celles que l'on avait adoptées auparavant pour les lignes à 150 kV. Pour les petites portées, on conserva la disposition des câbles de la ligne à 150 kV Innertkirchen-Bickigen, car les essais et les expériences pratiques permettaient d'attendre une sécurité d'exploitation suffisante.

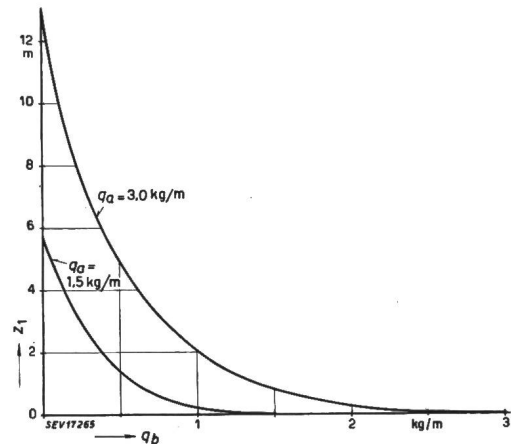


Fig. 25

Ordonnées:  $z_1$  position maximum atteinte par le câble oscillant au-dessus de la position de repos du câble déchargé à 0...1,5...3 kg/m

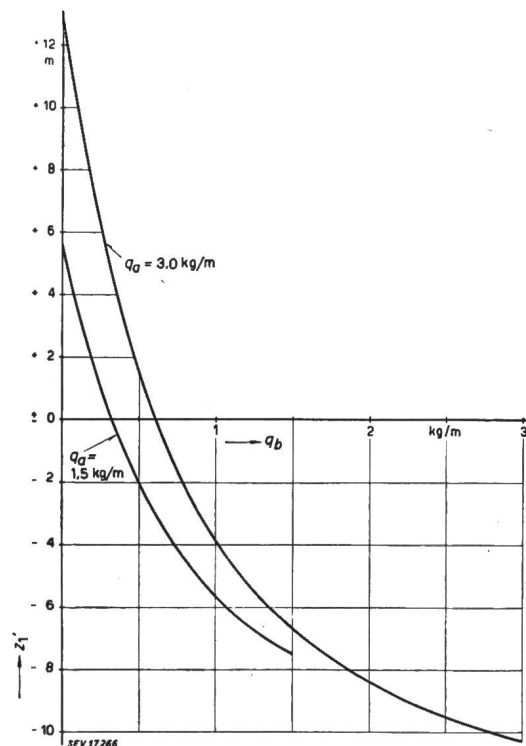


Fig. 26

Ordonnées: position maximum atteinte par le câble oscillant, au-dessus de la position de repos du câble complètement déchargé

Fig. 25 et 26

Influence de la surcharge résiduelle  $q_b$  sur la hauteur de rebondissement du câble (170,5 mm<sup>2</sup> Al + 39,8 mm<sup>2</sup> ac.) déchargé brusquement dans la portée S...T

( $a = 342$  m), les pylônes S et T étant équipés de chaînes de suspension aux pylônes S et T

Courbe supérieure: surcharge initiale de la portée S...T  $q_a = 3,0$  kg/m

Courbe inférieure:  $q_a = 1,5$  kg/m

La disposition des câbles de la ligne à 150 kV Innertkirchen-Mühleberg, indiquée aux figures 28 et 29, a donné pleine satisfaction jusqu'à maintenant. Nous savons, toutefois, qu'en présence de conditions défavorables extraordinaires, des dérangements pourraient aussi s'y produire. A notre

frais nécessaires pour une augmentation de la sécurité de l'exploitation.

Le but principal de cet article a été de présenter les résultats les plus importants des essais exécutés sur les oscillations des câbles de la ligne à 150 kV Innertkirchen-Bickigen; dans les limites fixées, on

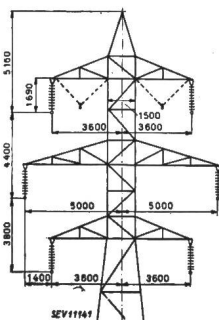


Fig. 27

Ligne à 150 kV  
Innertkirchen-Bickigen  
exécutée en 1927/28  
Lignes à tirets suspension à  
triangle, adoptée plus tard  
pour les grandes portées

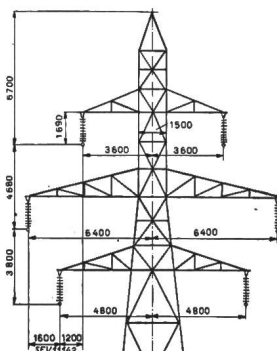


Fig. 28

Ligne à 150 kV  
Innertkirchen-Mühleberg  
exécutée en 1942  
Pylône porteur pour portées  
jusqu'à 300 m environ

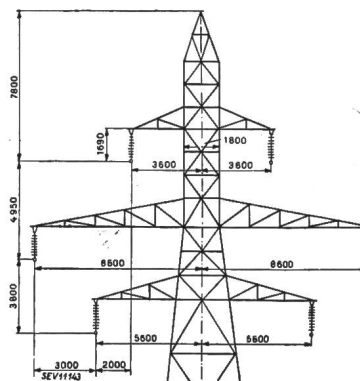


Fig. 29

Ligne à 150 kV  
Innertkirchen-Mühleberg  
Pylône porteur pour portées  
plus grandes

Fig. 27, 28 et 29

Dispositions des câbles conducteurs

avis, il n'est pas possible de construire économiquement une ligne, de façon telle que son exploitation soit encore entièrement sûre dans les conditions les plus défavorables que l'on puisse imaginer. En pratique, on doit considérer les possibilités et la probabilité de dérangements et les

considéra les résultats des essais seulement dans la mesure où ils pouvaient présenter un intérêt pour les constructeurs et les propriétaires de lignes électriques à haute tension.

Adresse de l'auteur:

H. Oertli, Dr ès sc. techn., Ingénieur aux Forces Motrices Bernoises S. A., Berne.

## Peroxydbestimmungen während der künstlichen Alterung von Isolierölen mit Kupferkatalyt

Von M. Zürcher und J. Lüder, Zürich

621.315.615.2.0014

Es wird eine Methode beschrieben, welche eine quantitative Bestimmung der Peroxyde gestattet, die bei der katalytischen Alterung von Mineralölen in Gegenwart von Kupfer entstehen. Die laufende Bestimmung der Peroxydzahlen gestattet die gleichen Rückschlüsse auf die Qualität des Öles, die aus den Beobachtungen über die Reißfestigkeit des Baumwollfadens gefolgert werden, sind jedoch zuverlässiger als diese. Es wird ferner gezeigt, dass durch die Verwendung von Kupfernaphthenat Alterungsreaktionen der gleichen Art wie mit metallischem Kupfer hervorgerufen werden.

Les auteurs décrivent une méthode permettant de déterminer quantitativement les peroxydes qui se forment lors du vieillissement catalytique des huiles minérales en présence de cuivre. Pour se rendre compte de la qualité d'une huile, la détermination continue des indices de peroxyde donne des résultats plus sûrs que l'observation de la résistance à la rupture du fil de coton. D'autre part, les auteurs signalent que l'emploi de naphthénate de cuivre conduit à des réactions de vieillissement analogues à celles du cuivre métallique.

### Einleitung

Die Alterungserscheinungen an Transformatorenölen, die sich im wesentlichen in der Bildung von Schlamm und in einer Erhöhung der Säurezahl äussern, sind zur Hauptsache die Folge von langsamen Oxydationen, von chemischen Reaktionen, die unter der Einwirkung des Luftsauerstoffs, allenfalls unter Mitwirkung von Katalysatoren verlaufen. Solchen Vorgängen liegt, besonders wenn sie katalytisch beschleunigt werden, ein sehr komplizierter Reaktionsmechanismus zugrunde. Neben dem Auftreten von vielgestaltigen Kondensations-

und Polymerisationsreaktionen wird die Übersicht dadurch erschwert, dass die Bindung des Sauerstoffs aus der Luft sehr oft stufenweise verläuft, unter Bildung von unbeständigen Zwischenprodukten, in denen der Sauerstoff intermediär in superoxydartiger Bindung vorliegt. Berücksichtigt man ferner, dass Mineralöle keine einheitlichen Verbindungen sind, sondern aus Mischungen verschiedener Komponenten in variablen Verhältnissen bestehen, so ist es verständlich, dass eine Voraussage über das Verhalten von Ölen während einer betriebsmässigen, langfristigen Alterung nur unter