

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	8 (1917)
Heft:	3
Artikel:	La révision des prescriptions fédérales suisses concernant la construction des lignes électriques
Autor:	Pillonel, A.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1059582

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: 16.01.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen „Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz“ sowie „Jahresheft“ und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon 9571

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 - Telephon 6741

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft und Statistik:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A.S.E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la „Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse“, ainsi que l'„Annuaire“.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Téléphone 9571
Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:
Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Hirschengraben 80/82 Zurich 1 - Téléphone 6741

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A.S.E.), y compris l'Annuaire et la Statistique, Fr. 15.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

VIII. Jahrgang
VIII^e Année

Bulletin No. 3

März
Mars 1917

La révision des prescriptions fédérales suisses concernant la construction des lignes électriques

par A. Pillonel, adjoint de la Direction des Télégraphes du 1^{er} arrondissement.

I.

En 1908 le Conseil fédéral Suisse a édicté sur l'établissement et l'entretien des lignes électriques des prescriptions qui ont suscité un vif intérêt dans les journaux techniques. Elles ont considérablement modifié celles du 7 juillet 1899. Jusqu'à cette dernière date, il n'existe aucun règle administrative concernant l'établissement des lignes. Ce n'est qu'après les graves accidents qui ont marqué l'an 1898 que la nécessité de réglementer la construction des lignes électriques a été fortement ressentie. Les prescriptions de 1899 n'étaient pas encore très sévères pour les lignes télégraphiques et téléphoniques. Des portées en alignement étaient tolérées jusqu'à 60 mètres et la charge des poteaux pouvait aller¹⁾:

jusqu'à 30 fils de 1,5 mm sur un poteau simple
" 200 " " " " " double
" 300 " " " " " triple.

Entre chevalets sur toit, des portées jusqu'à 100 mètres étaient admises²⁾.

Enfin les constructions en fer (colonnes pour câbles, supports centraux, chevalets) devaient offrir une sécurité minimale de 1 à la rupture ou au renversement, en admettant que tous les fils rompissent d'un seul côté³⁾.

Quant à la tension des fils, il fallait qu'elle n'excédaît pas le $\frac{1}{3}$ de la charge de rupture à -20°C , en ne tenant compte que du poids propre du fil et de son allongement⁴⁾.

¹⁾ Art. 21; ²⁾ Art. 22; ³⁾ Art. 23 de l'arrêté du Conseil fédéral suisse concernant les prescriptions générales sur les installations électriques (du 7 juillet 1899). ⁴⁾ Art. 16.

Pour les lignes à courant fort, on trouve dans les prescriptions de 1899 des dispositions qui étaient beaucoup plus rigoureuses. Ainsi les portées⁵⁾ étaient limitées à 50 mètres pour une section totale des fils de cuivre jusqu'à 100 mm², à 45 mètres pour une section totale de 100—200 mm², et à 40 mètres pour les lignes de plus de 200 mm². Alors qu'on ne demandait aucune sécurité dans le sens de la ligne pour les appuis des lignes à faible courant montées sur poteaux en bois en alignement, on exigeait déjà, pour les poteaux des lignes à fort courant, une sécurité de 1 à la rupture en admettant que tous les fils fussent rompus d'un seul côté et en ajoutant l'effort du vent sur les poteaux⁶⁾. La tension maximale des fils ne devait pas excéder le $1/5$ de leur charge de rupture à -20°C ., en ne tenant compte que de leur poids propre⁷⁾.

Les prescriptions de 1908 ont étendu aux lignes à faible courant les règles ci-dessus qui font dépendre la longueur de la portée de la section totale des fils. On est parti de l'idée qu'il n'y avait pas lieu d'établir des modes de calculs différents pour les lignes électriques à fort ou à faible courant. Cette manière de voir est juste, à la condition qu'on tienne compte dans certains cas des degrés de dangers que présentent ces lignes. Dans les prescriptions de 1908, il a été introduit encore d'autres modifications que nous relèverons tout à l'heure.

De vives critiques n'ont pas tardé à s'élever, parce que certains articles posent des principes excessifs en opposition avec l'expérience et entraînent à des dépenses inutiles. Malgré tout, il faut reconnaître que de très sérieux progrès ont été réalisés en Suisse dans la construction des lignes, sous la réglementation de 1899 et de 1908. Des prescriptions techniques ne peuvent atteindre du premier coup la perfection; elles doivent naturellement être revues chaque fois que le besoin s'en fait impérieusement sentir et que la technique, en se développant, a modifié ses règles.

La commission des télégraphes et des téléphones récemment instituée, se composant de représentants de la Direction générale des Télégraphes et des associations du personnel, a adopté une résolution demandant la révision des articles 28—30 des prescriptions relatives à la construction et à l'entretien des lignes à faible courant (lignes télégraphiques et téléphoniques de la Confédération et des chemins de fer et lignes privées concédées).

Mais ce serait, à notre avis, une erreur que de limiter la révision à ces trois articles. Il en est d'autres, par ex. les 19^{me} et 33^{me}, qui doivent être réformés.

Nous reproduisons ci-dessous les articles 19, 28, 29, 30 et 33 particulièrement visés par ces lignes:

Art. 19. „La flèche des fils doit être telle qu'aux températures les plus basses de l'endroit, et en tenant compte de leur poids propre seulement, la sécurité à la rupture soit au moins égale à 3.“

Art. 28. „Tous les supports doivent être assez forts pour résister, dans les conditions de sécurité à la rupture indiquée à l'art. 29, à la pression du vent agissant dans le sens le plus défavorable et à l'effort maximum dû aux fils.“

„Les hypothèses de l'article 29 doivent servir de base au calcul.“

Art. 29. „Les calculs de résistance des supports doivent être basés sur les hypothèses suivantes:

1 a. La ligne se trouve en état normal de service, et la pression du vent agit dans le sens le plus défavorable. La tension du fil atteint le $1/3$ de leur résistance à la rupture.“

„b. Les supports sont soumis non pas à la traction bilatérale normale, mais à une traction unilatérale comportant encore, après leur flexion, 5 % de la traction des fils définie sous a, et en outre la pression du vent agit dans le sens le plus défavorable.“

„2. La pression du vent doit être admise à 100 kg par m² de surface frappée normalement; pour les surfaces cylindriques, on ne comptera comme largeur que les $7/10$ du diamètre. Pour le calcul des efforts dus à la pression du vent sur les fils de ligne, ceux-ci doivent être considérés comme rigides.“

⁵⁾ Art. 52; ⁶⁾ Art. 54; ⁷⁾ Art. 50 du même arrêté.

„3. Le poids spécifique du béton doit être admis au maximum à 2,2; celui du bois, au maximum à 0,75.“

„4. Dans les hypothèses faites sous lettre a et dans celles faites sous lettre b, chiffre 1^{er}, les supports en bois doivent avoir un coefficient de sécurité à la rupture d'au moins 4, ceux en fer d'au moins 3.“

„5. Pour le calcul des supports en béton armé la limite admissible du travail du béton à la compression est de 35 kg/cm² et celle du travail du fer à la tension de 1000 kg/cm².“

„6. Le rapport du coefficient d'élasticité du fer à celui du béton doit être admis à 15 au maximum.“

„La résistance des supports en béton armé peut aussi être démontrée par une épreuve de charge; cette épreuve doit faire ressortir le coefficient de sécurité à la rupture à 3 au moins. Dans les cas douteux, des épreuves de charge peuvent être exigées par les services du contrôle.“

Art. 30. En alignement, la portée des lignes aériennes sur poteaux en bois ne doit pas dépasser les chiffres ci-après:

Lignes jusqu'à 100 mm ² de section totale des fils: portée 50 mètres	
„ de 100 à 200	45
„ de plus de 200	40

„De part et d'autre des angles et en cas de notables différences de niveau des points d'appui, comme aussi dans les contrées où il faut s'attendre à de fortes chutes de neige et à des tempêtes violentes, les portées doivent être réduites suivant l'importance des efforts, ou bien les poteaux doivent être renforcés en conséquence.“

„De plus grandes portées ne peuvent être admises qu'exceptionnellement, par exemple au passage de rivières, de ravins profonds, etc., où il n'est pas possible d'observer les limites ci-dessus.“

Art. 33. „Tous les supports en fer et en bois doivent être calculés dès le début pour le nombre maximum des fils, c'est-à-dire pour la charge maximum. Lorsque celle-ci est atteinte, il est défendu de fixer d'autres fils aux supports, même provisoirement.“

Les prescriptions établies pour les lignes à fort courant sont, en ce qui concerne le calcul des lignes, à peu près les mêmes. La tension maximale des fils ne doit cependant pas excéder le 1/5 de leur charge de rupture⁸⁾.

II.

Une comparaison entre les prescriptions de 1899 et celles de 1908, en ce qui touche les lignes télégraphiques et téléphoniques, est utile. Elle nous permettra de signaler en même temps les critiques qui se sont fait jour.

a. Longueur de la portée.

L'ancien règlement de 1899 admettait des portées jusqu'à 60 mètres en alignement et jusqu'à 100 mètres entre chevalets sur toit dans les localités. La longueur de la portée a été fixée indépendamment du nombre et du diamètre des fils, c'est-à-dire sans prendre en considération le poids à supporter par les appuis, ni la résistance des fils. Les prescriptions de 1908 ont limité la longueur de la portée à 50 mètres pour toutes les lignes dont la somme des sections de fils n'excède pas 100 mm², à 45 mètres pour les charges de 100—200 mm² et à 40 mètres pour les supports dont la charge est supérieure à 200 mm².

Une première question qu'on doit se poser ici est celle-ci: De quels facteurs dépend la longueur de la portée? Nous avons déjà répondu à cette interrogation dans une étude

⁸⁾ Art. 49 des Prescriptions sur l'établissement et l'entretien des installations électriques à fort courant.

antérieure sur „*la détermination de la longueur des portées*“⁹⁾. Nous avons montré que théoriquement la longueur d'une portée dépend de la résistance mécanique du fil tendu dans cette portée et de l'effort maximum auquel est soumis le même conducteur. En Suisse, l'effort maximum est provoqué par la neige ou le givre. Connaissant la plus grande surcharge trouvée sur un mètre de fil et la résistance mécanique de celui-ci, on peut, en s'imposant un certain coefficient de sécurité, déterminer la longueur de la portée pour chaque espèce et diamètre de conducteur. Cette longueur de la portée étant calculée pour chaque sorte de fil, il n'est point nécessaire de se préoccuper du *nombre* des conducteurs. Ce dernier facteur ne doit intervenir que dans l'appréciation de la charge pour le calcul des *appuis*. Nous avons fait remarquer dans l'étude citée plus haut que pour des raisons *économiques* on a intérêt, lorsqu'il s'agit de lignes dont le nombre des fils croît constamment, à raccourcir la portée théorique pour éviter un doublement trop rapide des appuis. Mais il est évident que le rôle d'un règlement administratif n'est pas de s'immiscer dans les questions économiques. Son but consiste bien plus à réglementer la construction au point de vue *mécanique*, afin de préserver des accidents le public et le personnel occupé à la construction et à l'entretien des lignes et afin d'assurer la solidité des lignes elles-mêmes dans des limites raisonnables et suffisantes. Or si l'on part de ce principe fondamental que la longueur d'une portée dépend de la résistance mécanique du fil, on voit que ni le règlement de 1899, ni les prescriptions de 1908 ne sont élaborés de façon satisfaisante. Le règlement de 1899, ainsi que nous l'avons fait ressortir, autorise des portées jusqu'à 60 mètres, voire même jusqu'à 100 mètres pour toutes les espèces de fils, alors que d'après les expériences faites en Suisse, le fil en bronze de 1,5 mm utilisé dans les réseaux urbains, s'est rompu fréquemment par les grandes surcharges dans les portées supérieures à 40 mètres, quand il n'a pas une flèche exceptionnelle. Même les prescriptions de 1908 ne donnent pas une sécurité suffisante lorsqu'on emploie du fil de bronze de 1,5 mm de diamètre puisqu'on peut tirer ce fil avec une tension de pose de $\frac{1}{3}$ de la charge de rupture dans une portée de 50 mètres.

D'autre part, les prescriptions de 1899 et celles de 1908, en imposant des portées de 40—50 mètres au maximum pour les gros fils employés sur les lignes industrielles ont exigé des entreprises des dépenses parfois excessives. Le Conseil fédéral suisse l'a reconnu en autorisant à plusieurs reprises, depuis quelques temps, des portées jusqu'à 120—150 mètres pour de grandes lignes de transport. Qu'on exige un raccourcissement des portées à toutes les traversées de routes, chemins de fer, lignes électriques, etc., c'est légitime. Le raccourcissement d'une travée est un supplément de sécurité. Mais que cette mesure soit imposée à toutes les portées, c'est exagéré.

Le Département fédéral des postes et chemins de fer a chargé la Direction générale des télégraphes suisses et l'inspectorat de l'Association Suisse des électriciens d'ordonner des essais systématiques concernant les surcharges de neige et de givre qui s'attachent aux fils. Les essais seront faits par des bureaux téléphoniques de 1^{ère} et 2^{me} classe qui ont été choisis dans diverses régions et altitudes de la Suisse, d'après la carte des pluies, ainsi que par un certain nombre d'usines électriques. Ces mesures opérées sur différents points du territoire suisse, à la condition qu'elles soient suffisamment nombreuses, fourniront des indications excessivement intéressantes et utiles pour réglementer la longueur des portées.

Il est des fonctionnaires qui s'imaginent qu'on peut suivre deux courants dans la théorie des lignes: se rattacher au principe des longues portées ou à celui des courtes portées. C'est une erreur complète de poser la question de cette manière. De grandes portées ne sont possibles qu'avec des fils très résistants et pour les conducteurs de faible diamètre, il faut se contenter de portées beaucoup plus courtes.

Les essais ordonnés par le Département fédéral permettront d'établir les longueurs des portées maximales pour les différents fils utilisés sur les lignes, en se servant de notre formule¹⁰⁾

⁹⁾ Voir Journal télégraphique août 1915 à mars 1916.

¹⁰⁾ Voir Journal télégraphique 1915, page 242.

$$a_c = \sqrt{24 \frac{\epsilon}{s} \frac{T'_0}{p'^2} \frac{3}{}} \quad (1)$$

où a_c désigne la portée critique en mètres, ϵ le coefficient élastique du fil, T'_0 la plus haute traction tolérée dans le fil en kg, s la section du conducteur en mm^2 , et p' le poids total du fil, y compris sa surcharge par mètre courant, en kg.

En appelant σ_{\max} le maximum de tension horizontale par mm^2 , E le module d'élasticité et en rapportant le poids maximum p' à l'unité de section, M. le Dr. Koestler¹¹⁾ a mis la formule ci-dessus sous la forme générale

$$a_c = 2 \frac{\sigma_{\max}}{p'_{\max}} \sqrt{6 \frac{\sigma_{\max}}{E}} \quad (1a)$$

Nous ferons remarquer à cette occasion que les relations (1) et (1a) sont extraites de l'équation du 3^{me} degré

$$T_0^3 + T_0^2 \left(\frac{a^2 p'^2}{24 T_0^2 \frac{\epsilon}{s}} - T'_0 \right) = \frac{a^2 p^2}{24 \frac{\epsilon}{s}}$$

Mais celle-ci a été quelque peu simplifiée. Complète, elle a la teneur suivante :

$$(a) \quad T_0^3 + T^2 \left(\frac{a^2 p'^2}{\frac{\epsilon}{s} (24 T_0^2 + a^2 p^2)} - T'_0 \right) = \frac{a^2 p^2 T_0^2}{\frac{\epsilon}{s} (24 T_0^2 + a^2 p^2)}$$

On obtient alors pour la portée critique

$$a_c = 2 \frac{\sigma_{\max}}{p'_{\max}} \sqrt{6 \frac{\sigma_{\max}}{E - \sigma_{\max}}} \quad (1b)$$

Ainsi, par exemple, si les essais démontrent que la plus grande surcharge déposée sur le fil de bronze de 2 mm est de 1 kg (y compris le poids propre du fil) ou 0,318 kg par mm^2 et si l'on admet que la tension tolérée est égale à la limite d'élasticité, qui vaut pour ce fil 50 kg par mm^2 , que $E = 12800$, on a

$$a_c = 2 \cdot \frac{50}{0,318} \sqrt{6 \cdot \frac{50}{12800 - 50}} = 50,2 \text{ mètres.}$$

soit, rond, 50 mètres.

Il n'y a cependant aucun inconvénient à adopter la formule (1a) au lieu de (1b). La première donne une portée critique a_c un peu plus courte, ce qui représente un avantage au point de vue de la sécurité.

Proposition.

Nous proposons donc de modifier l'art. 30, chiffre 1, comme suit :

Art. 30.

1. En alignement, la portée des lignes aériennes ne doit pas dépasser la longueur de la portée critique donnée par la formule suivante

$$a_c = \frac{2 \sigma_{\max}}{p'_{\max}} \sqrt{6 \frac{\sigma_{\max}}{E}}$$

dans laquelle a_c désigne la portée critique, σ_{\max} la tension maximale en kilog. par millimètre carré admise pour le fil,¹²⁾ p'_{\max} , le poids du fil (y compris sa surcharge maximale), exprimé en kg/mm^2 , E le module d'élasticité du fil en kg/mm^2 .

¹¹⁾ Elektroindustrie: Zweckmässige Berechnung der Freileitungen, Dr. Koestler, ing. (page 328 de 1916).

¹²⁾ Dans le chapitre suivant, en discutant la révision de l'article 19, nous montrerons que cette tension maximale est égale à la limite d'élasticité.

b. Tension de pose du fil.

(Article 19-des prescriptions.)

Les prescriptions de 1908 n'ont apporté aucune modification à celles de 1899 quant à la tension du conducteur. Le maximum de celle-ci a été maintenu au $\frac{1}{3}$ de la charge de rupture du fil à -20°C , sans tenir compte des surcharges.

L'expérience montre que cette tension de pose *maximale* est beaucoup trop élevée. Les petits fils se rompent encore souvent par les fortes chutes de neige, malgré le raccourcissement des portées, parce que d'une part beaucoup d'ouvriers ont conservé la mauvaise habitude de tendre fortement les fils, que d'autre part, les fonctionnaires ne surveillent pas assez ce travail et parce qu'enfin aucun contrôle régulier n'est exercé par l'administration sur la tension de pose. Puisque tous les efforts se transmettent aux appuis, la tension de pose est évidemment le point qui doit retenir le plus l'attention. Il ne sert de rien de calculer les appuis, si les efforts des fils sont inconsciemment multipliés. Le défaut de surveillance de la tension de pose a déjà provoqué, on peut l'affirmer, un nombre considérable de dérangements. L'administration réalisera sans nul doute bien des économies, dans le chapitre de l'entretien, si elle se décidait à instruire et à contrôler son personnel dans ce domaine. Nous avons aussi constaté que des agents se font la fausse idée qu'il faut appliquer le *maximum* de la tension de pose. Enfin, il y a lieu de relever que tous les appuis d'angle sont calculés, la ligne étant en état d'exploitation normale, avec le maximum de tension de pose. Or, dans l'intérêt d'une saine économie, il faut abaisser le maximum de tension de pose.

La tension de pose qu'on doit adopter doit répondre à deux conditions qui sont opposées. Dans les courtes portées, comme on le sait, l'effet du froid prédomine; dans les longues portées, c'est au contraire, la surcharge. Cherchons la portée intermédiaire où les actions des surcharges et du froid sont égales.

La variation élastique par refroidissement est donnée par la formule

$$T_0^3 - T_0^2 \left[T'_0 - \frac{\delta s}{\varepsilon} (t - t') - \frac{p^2}{24 \frac{\varepsilon}{s}} \cdot \frac{a^2}{T'_0^2} \right] = \frac{a^2 \cdot p^2}{24 \frac{\varepsilon}{s}} \quad (2)$$

et la variation de tension par surcharge, par l'équation

$$T_0^3 + T_0^2 \left(\frac{a^2}{T'_0^2} \cdot \frac{p'^2}{24 \frac{\varepsilon}{s}} - T'_0 \right) = \frac{a^2 \cdot p^2}{24 \frac{\varepsilon}{s}} \quad (3)$$

où T'_0 désigne la tension maximale du fil, T_0 la tension horizontale cherchée, ε le coefficient élastique du fil, s sa section en mm^2 , δ le coefficient de dilatation linéaire, a la portée, p le poids propre du fil, p' la surcharge, y compris le poids propre, $(t - t')$ la différence de température en degrés.

En égalisant les équations (2) et (3) et en résolvant par rapport à a , on obtient le point d'intersection des courbes (2) et (3) et par conséquent la portée *intermédiaire* cherchée que nous désignerons par a_i . On trouve, en simplifiant

$$\delta (t - t') = \frac{a^2}{24 T'_0^2} (p'^2 - p^2)$$

et

$$a_i = 2 T'_0 \sqrt{6 \delta \frac{(t - t')}{p'^2 - p^2}} \quad (4)$$

Cette formule a été donnée par Schauer à la suite d'une étude de Kohler.

Pour toutes les portées supérieures à a_i , c'est la surcharge qui joue le rôle prépondérant; pour toutes celles inférieures à a_i , c'est le refroidissement. Si, par exemple, nous appliquons cette formule au cas du fil de bronze de 2 mm, en admettant pour T'_0 la

limite d'élasticité = 50 kg/mm², une surcharge de 1 kg et une différence de température de 35° C on trouve $a_i = 19$ mètres \sim . La formule Schauer-Kohler met sous son vrai jour l'effet plutôt secondaire de la température.

On ne peut pas, avec les fortes surcharges que nous avons en Suisse, tendre les fils avec un fort coefficient de sécurité contre l'effet des surcharges. A la portée intermédiaire de 19 mètres, calculée ci-dessus, il faudrait encore donner au fil une flèche tout-à-fait exagérée pour conserver le coefficient de sécurité de 5 lorsque le fil serait surchargé d'un kilog. Si l'on veut utiliser rationnellement la matière, il faut, comme nous l'avons expliqué autérieurement dans le Journal télégraphique,¹³⁾ adopter la limite d'élasticité comme limite de travail du métal du conducteur, lorsqu'il s'agit des *surcharges*. On trouve alors, dans le cas choisi du fil de bronze de 2 mm, d'après l'équation (a) ci-devant, ou le terme en T_0^2 disparaît, puisque son coefficient est réduit à 0,

$$T_0^3 = \frac{(a p T'_0)^2 s}{\varepsilon (24 T'_0)^2 + a^2 p^2} \text{ et } T_0 = \sqrt[3]{\frac{(a p T'_0)^2 s}{\varepsilon (24 T'_0)^2 + a^2 p^2}}$$

En désignant par σ la tension T_0 par mm² ($\sigma = \frac{T_0}{s}$) et σ_{\max} la tension T'_0 maximale par mm² ($\sigma_{\max} = \frac{T'_0}{s}$); par D la densité du fil, par E le module d'élasticité du métal en kg/mm², il vient

$$\sigma = \sqrt[3]{\frac{(a D \sigma_{\max})^2 E}{24 \cdot 10^6 \sigma_{\max}^2 + (a D)^2}} \quad (5)$$

Pour notre fil de bronze de 2 mm, dont nous avons déjà déterminé la portée critique, on a

$$\sigma = \sqrt[3]{\frac{(50,235 \times 8,9 \times 50)^2 \cdot 12800}{24 \cdot 10^6 \cdot 50^2 + (50,235 \times 8,9)^2}} = 4,74 \text{ kg}$$

ce qui représente un coefficient de sécurité de $\frac{50}{4,74} = 10,55$.

Voyons un autre exemple, qui intéresse les lignes industrielles. Il s'agit, cette fois, de fil de cuivre dur de 6 mm dont la limite d'élasticité est de 30 kg. En supposant une surcharge de 1200 gr par mètre, ce qui donne pour $p'_{\max} = 1,452$ kg et par millimètre carré $\frac{1,452}{28,27} = 0,0514$ kg, la portée critique de ce fil a pour valeur, suivant la formule (1b) de la page 77

$$a_c = 136,45 \text{ mètres}$$

et $\sigma = 9,33 \text{ kg}$

ce qui donne une flèche de 2,26 m et un coefficient de sécurité de $\frac{30}{9,33} = 3,22$.

Ainsi donc le coefficient de sécurité doit être très élevé pour les petits fils et doit diminuer avec l'accroissement du diamètre.

La tension $\sigma = 4,74$ kg pour le fil de bronze de 2 mm de diamètre correspond dans la portée critique à une flèche f :

$$f = \frac{50235^2 \times 8,9}{8 \times 4,74 \times 1000} = 0,59 \text{ mètre à } 0^\circ \text{ C}$$

laquelle vaut à $+35^\circ \text{ C}$ 0,88 m.

¹³⁾ Voir No. 10 du Journal télégraphique de 1915.

Ce coefficient de sécurité de 10,55 est encore admissible pour les petits fils, parce que les portées qu'ils admettent sont courtes et que la flèche n'y est pas encore forte. Mais celle-ci croît avec le carré de la portée et un coefficient de sécurité de 10 entraînerait pour les gros fils — lesquels sont relativement moins chargés et permettent de longues portées — à des flèches très exagérées. Ainsi pour le fil de cuivre dur de 6 mm de tout à l'heure, la flèche dans la portée critique serait, avec un coefficient de sécurité de 10, de 6,90 m à 0° C!

Le coefficient de sécurité peut aussi être envisagé comme le rapport $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma}$. Alors, si dans l'équation (5) on néglige le terme $(aD)^2$ qui est très petit comparativement à $24 \cdot 10^6$. σ_{\max}^2 , on obtient pour le rapport $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma}$, en appelant c le coefficient de sécurité

$$c = \frac{100 \sigma_{\max}}{\sqrt[3]{(aD)^2 E / 24}} \quad (6)$$

Pour un même fil dans une portée différente, on a

$$c' = \frac{100 \sigma_{\max}}{\sqrt[3]{(a'D)^2 E / 24}} \quad (7)$$

ce qui donne en divisant (6) par (7)

$$\frac{a'^2}{a^2} = \frac{c^3}{c'^3}$$

Le cube des coefficients de sécurité, pour un même fil, est donc inversement proportionnel au carré de la portée.

Ceci montre encore qu'on ne peut pas adopter le même coefficient de sécurité indistinctement pour tous les fils, pour résister aux surcharges. Il n'y a pas d'autre moyen d'établir une règle claire et unique que de prescrire une traction maximale pour la plus grande surcharge constatée sur le fil.

On peut, en revanche, prévoir un coefficient de sécurité contre les contractions par le froid, car l'influence des grandes portées est ici favorable. Que, en ce qui concerne la résistance aux surcharges, l'on fasse coïncider la limite de travail avec la limite d'élasticité, c'est possible car l'action est de courte durée; mais cette méthode ne peut donner que de mauvais résultats quant aux effets du froid. Les efforts résultant de l'abaissement de température sont prolongés et ce serait dangereux de soumettre le matériel de ligne *entier* — nous insistons sur cet adjectif — à des forces constantes aussi considérables que celles approchant la limite d'élasticité. C'est donc non seulement pour assurer un travail normal du métal du fil qu'il faut déterminer un coefficient de sécurité élevé pour le conducteur, à la plus basse température, mais surtout pour *diminuer les efforts statiques permanents* sur les appuis et toutes les parties de la ligne et par là réaliser des économies de matériel. L'augmentation du coefficient de sécurité, contre l'action du froid (dans les petites portées) c'est-à-dire l'augmentation de la flèche des fils, ne constitue pas une dépense appréciable, mais l'économie faite sur le matériel des appuis est par contre très importante.

On a vu que lorsqu'il s'agit des fils de faible diamètre et de portées jusqu'à 50 mètres, le coefficient de sécurité pouvait être élevé à 10,5 à 0° C sans qu'il en résulte une flèche dangereuse; ce coefficient de 10,5 à 0° C s'abaisse à 7,5 à — 20° C. Mais pour les gros fils dans les longues portées, nous avons également vu que le coefficient de sécurité ne pouvait pas être si élevé, la flèche devenant trop forte. Un coefficient de sécurité de 5 à — 20° C donne déjà pour le fil de cuivre dur, dans la portée critique de 136,45 m une flèche de 3,45 m.

Dans les nouvelles prescriptions, il faut, à notre avis, déterminer deux tensions-limites pour les fils et rédiger l'article 19 comme suit:

Proposition.

Art. 19.

Pour les fils, il est admis :

1. *Une traction n'excédant pas la limite d'élasticité quand le fil est surchargé à 0° C, la valeur de la plus grande surcharge étant déterminée par des essais périodiques ordonnés par les offices de contrôle, ou bien*

2. *Une tension n'excédant pas le 1/5 de la charge de rupture des fils à -- 20° C.*

Avec cette rédaction on laisse aux offices de contrôle le soin de déterminer la valeur de la surcharge. N'est-il pas préférable, du moins pour le moment, de ne pas fixer dans les prescriptions fédérales des chiffres qui pourraient être démentis par une nouvelle forte chute, surtout si les essais préliminaires n'ont pas été faits assez longtemps.

La seconde limite du 1/5 de la charge de rupture n'empêchera nullement les entreprises industrielles ou l'Administration des télégraphes d'augmenter le coefficient de sécurité au-delà de 1/5, particulièrement dans les portées jusqu'à 50 mètres. On verra dans le chapitre suivant que cette considération a une grande importance.

Pour terminer ce chapitre relatif à la tension des fils, qu'on nous permette encore quelques mots sur le contrôle de la tension de pose. Il est d'une telle simplicité, qu'on ne peut guère si opposer, étant données les garanties qu'il donne pour la sécurité des lignes. Il est à noter que le contrôle n'a lieu qu'une fois pour un nouveau fil, après sa pose. La mesure de la flèche ne se fait que dans les deux portées adjacentes à une terminale, la tension horizontale du fil dans une portée étant la même dans toutes les autres portées d'une même couronne de fil. Le contrôle ne s'adapte qu'aux nouvelles lignes ou aux lignes en reconstruction. Il suffit de relever les flèches et les températures dans une colonne ad hoc des formulaires des inventaires de ligne. Il n'est pas nécessaire de mesurer la flèche de chaque fil de même diamètre et de même matière dans une portée, attendu qu'ils doivent avoir la même flèche.

Nous avons expliqué dans notre étude sur „la détermination de la longueur des portées“ comment on contrôle aisément la tension, ou plutôt la flèche, à l'aide de la méthode des vibrations transversales. Disons seulement, à propos de ce procédé, que lorsqu'un fonctionnaire est seul en inspection le long d'une ligne, il est plus commode pour lui, au lieu de compter le nombre des périodes en une ou demi-minute et d'avoir l'oeil sur la montre et les fils à la fois, de mesurer à l'aide d'un chronographe ordinaire la durée de 5, 10, 20, 30 périodes, etc., suivant la valeur de la flèche. Pour les grandes flèches, il est en effet préférable de mesurer la durée de quelques pulsations seulement.

La formule

$$f = \frac{1,226}{\left(\frac{n}{t}\right)^2} \text{ mètres}$$

(dans laquelle f désigne la flèche en mètres, n le nombre de vibrations simples et t le nombre de secondes qu'ont duré les n vibrations) doit être alors transformée comme suit:

$$f = \frac{1,226 t^2}{n^2}, \text{ d'où } t = \frac{n}{1,107 \sqrt{f}}.$$

En faisant, dans cette relation, $n = 60$ on a $t = 54,2 \sqrt{f}$. Voici pour les flèches de 0,10 à 1,06 mètre, la durée de 30 périodes ou 60 vibrations simples:

Flèche cm	Durée de 60 vibrations simples en secondes						
10	17,0	34	31,6	58	41,3	82	49,1
11	18,0	35	32,1	59	41,6	83	49,4
12	18,7	36	32,5	60	42,0	84	49,7
13	19,5	37	33,0	61	42,3	85	50,0
14	20,3	38	33,4	62	42,7	86	50,3
15	21,0	39	33,8	63	43,0	87	50,6
16	21,6	40	34,3	64	43,4	88	50,9
17	22,4	41	34,7	65	43,7	89	51,2
18	23,0	42	35,1	66	44,0	90	51,4
19	23,6	43	35,5	67	44,4	91	51,7
20	24,2	44	36,0	68	44,7	92	52,0
21	24,8	45	36,4	69	45,1	93	52,3
22	25,4	46	36,8	70	45,4	94	52,6
23	26,0	47	37,2	71	45,7	95	52,8
24	26,6	48	37,6	72	46,0	96	53,1
25	27,1	49	37,9	73	46,3	97	53,4
26	27,6	50	38,3	74	46,6*	98	53,7
27	28,2	51	38,7	75	46,9	99	53,9
28	28,7	52	39,1	76	47,3	100	54,2
29	29,2	53	39,5	77	47,6	101	54,5
30	29,7	54	39,8	78	47,9	102	54,7
31	30,2	55	40,2	79	48,2	103	55,0
32	30,7	56	40,6	80	48,5	104	55,3
33	31,1	57	40,9	81	48,8	105	55,6
						106	55,8

c. Du calcul des appuis.

Le calcul des appuis a été envisagé d'une manière très différente dans les prescriptions de 1899 et de 1908. Pour les poteaux en alignement des lignes à faible courant, on se bornait en 1899, à indiquer une charge maximale¹⁴⁾ de

30 fils de 1,5 mm de diamètre pour poteaux simples
 200 " 1,5 " " " " doubles
 300 " 1,5 " " " " triples.

Ces deux dernières charges étaient évidemment trop fortes.

En revanche les colonnes pour cables,¹⁵⁾ les supports centraux et les chevalets sur toit devaient offrir une sécurité minima de 1 à la rupture ou au renversement, même en admettant que tous les fils rompent d'un seul côté, mais sans tenir compte de l'action du vent. Ces prescriptions ne disaient pas quelle tension il fallait admettre pour les fils subsistant dans la portée adjacente.

Aucune règle n'était prévue pour le calcul des poteaux d'angle. Cette dernière lacune a été réparée en 1908.

Quant aux poteaux en alignement des lignes à *fort courant*, ils devaient être calculés¹⁶⁾ de manière à offrir une sécurité minima de 1 à la rupture en admettant que tous les fils rompent d'un seul côté et en tenant compte de l'effort du vent sur la ligne. Aucune distinction n'était faite entre les poteaux des lignes à haute et à basse tension. Cette règle n'en paraissait que d'autant plus dure.

¹⁴⁾ Art. 21; ¹⁵⁾ Art. 23; ¹⁶⁾ Art. 54.

Aussi des plaintes émanant des entreprises industrielles n'ont-elles pas tardé à se faire entendre. L'industrie électrique faisait valoir la différence considérable de traitement qui existait entre les lignes à faible courant et celles à fort courant. Il faut en effet, remarquer que les prescriptions de 1899¹⁷⁾ réduisaient considérablement la longueur des portées que les conducteurs des lignes à fort courant auraient été en état de supporter et que malgré la sécurité obtenue ainsi contre les surcharges par le raccourcissement des travées, il était encore exigé une sécurité de 1 au renversement en composant la pression du vent de 100 kg/m^2 avec une traction unilatérale des fils sans tenir compte de la flexion des appuis.

Ces règles de construction ont été reconnues trop sévères, de nouvelles prescriptions ont été étudiées et mises en vigueur en 1908. On en a fait de deux sortes, une pour les installations à fort courant et l'autre pour celles à faible courant. Néanmoins les dispositions concernant le calcul des appuis sont les mêmes sauf sur un point que nous avons déjà signalé: la tension de pose des fils est au maximum de $1/5$ pour les fils industriels et de $1/3$ pour les fils à faible courant.

Nous allons analyser brièvement l'art. 29 des prescriptions sur les installations à faible courant (reproduit au commencement de cette étude). Il établit, pour la première fois, une distinction nette et claire, pour le calcul des appuis, entre le *régime normal d'exploitation de la ligne et l'accident*. Cette distinction est parfaitement légitime et doit être maintenue à l'avenir; elle a le grand avantage de bien mettre en lumière les divers efforts auxquels la ligne et les appuis en particulier doivent faire face.

1. L'état d'exploitation.

L'article 29 prescrit que *normalement* les appuis doivent résister aux efforts de traction des fils et à une pression du vent de 100 kg/m^2 ; *accidentellement*, à une traction unilatérale des fils égale au 5 % de la traction normale et en sus à une pression du vent de 100 kg/m^2 dans le sens le plus défavorable.

On remarquera qu'on ne tient pas compte pour l'état d'exploitation de tous les facteurs atmosphériques. Le vent seul est pris en considération. La neige, le givre, c'est-à-dire les surcharges qui ont tant dégradé les lignes suisses, sont laissées de côté. Or l'expérience montre que le poids des surcharges est parfois considérable. Il atteint et dépasse souvent 1 kg par mètre courant de conducteur. La charge des poteaux augmente pendant ces fortes chutes de neige dans des proportions inquiétantes. Comme il s'agit là d'un phénomène atmosphérique périodique, qui se repète pour le moins aussi fréquemment qu'une pression du vent de 100 kg, il est indispensable d'introduire ce facteur dans le calcul des appuis pour le régime d'exploitation. Les prescriptions tiennent implicitement compte de ces surcharges, il est vrai, en limitant les portées suivant l'art. 30, reproduit à la page 5. Mais on peut objecter avec raison que cette façon de procéder est trop vague. Quand une travée est trop chargée, n'est-il pas plus naturel, plus logique de renforcer les appuis au lieu de raccourcir la portée, cette dernière mesure nécessitant une forte main d'œuvre?

Pour les lignes à faible courant la traction maximale des fils est fixée au $1/3$ de la charge de rupture à -20° C , tandis que pour les lignes à fort courant c'est le $1/5$ à -20° C qui fait loi. Il en résulte cette anomalie que les efforts admis pour les poteaux d'angle des lignes télégraphiques et téléphoniques sont plus élevés que ceux admis pour les mêmes appuis des lignes industrielles, celles-ci étant cependant plus dangereuses. C'est ici qu'éclate tout l'intérêt qui s'attache à la tension de pose et à son contrôle. Il n'existe aucune raison pour tolérer, en faveur des lignes télégraphiques et téléphoniques des tensions de fils plus élevées que celles fixées pour les conducteurs industriels, d'autant plus que, comme on le voit, cette tolérance concernant les fils a une répercussion contraire dans le calcul des appuis. Les fils à faible courant ayant généralement un diamètre plus faible que leurs frères des courants forts, les chances de rupture pour les premiers sont

¹⁷⁾ Art. 52.

plus élevées. C'est là une raison pour que leur coefficient de sécurité ne soit dans tous les cas, pas inférieur.

Au sujet de la limite du travail, la même observation que nous avons faite concernant les fils s'impose vis-à-vis des appuis. La tension des conducteurs atteignant la limite d'élasticité quand ils sont surchargés fortement, il est légitime d'utiliser la matière des supports jusqu'à son extrême limite également, soit jusqu'à la limite d'élasticité. D'après ce mode de faire la résistance exigée des appuis serait plus grande que maintenant, en service d'exploitation, car l'effort de traction maximum du fil serait fixé à environ $\frac{3}{4}$ de la charge de rupture, la limite d'élasticité pour le bronze et le cuivre dur correspondant à peu près à ce rapport. Actuellement l'effort maximum du fil est limité au $\frac{1}{3}$ de la charge de rupture. Il est vrai que la limite de travail du bois, qui est d'après les prescriptions de 1908 de $\frac{1}{3}$ de la charge de rupture serait aussi élevée à la limite d'élasticité, laquelle est approximativement la moitié de la charge de rupture. Mais l'élévation de la limite de travail du bois ne correspond pas à l'augmentation de l'effort des fils. Ainsi pour la flexion, en appelant R' la charge de rupture du fil, L la hauteur moyenne des conducteurs, W le module de résistance $\left(\frac{I}{V}\right)$ et R'' la charge de rupture du bois, on a maintenant l'équation d'équilibre

$$\frac{1}{3} R' L = \frac{1}{3} R'' W$$

et suivant notre proposition

$$\frac{3}{4} R' L = \frac{1}{2} R'' W.$$

En divisant l'une par l'autre ces deux relations et en simplifiant, on voit que maintenant on a le rapport de sécurité $\frac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{3}} = 1$ et d'après notre procédé $\frac{\frac{3}{4}}{\frac{1}{2}} = 1\frac{1}{4}$.

Ce résultat ne serait que bon, car il est logique que pour les efforts prolongés, pour l'état permanent du service d'exploitation, la sécurité soit bien assurée.

Nous en arrivons aux efforts extraordinaires provoqués par le vent et les surcharges. Actuellement, on tient compte, en service normal, d'une pression du vent de 100 kg/m^2 , mais on laisse de côté les surcharges. On peut tenir pour certain qu'un vent de 100 kg/m^2 , qui est celui d'une tempête violente, ayant une vitesse de 28 mètres à la seconde ou 100 km à l'heure, détruira toutes les surcharges qui se seraient déposées sur les fils. Il est donc parfaitement juste de ne tenir compte que d'un des deux éléments, vent ou surcharge. Mais ce n'est pas toujours l'action du vent qui prédomine sur la surcharge-limite. Ainsi pour un fil de 3 mm de diamètre l'action du vent correspond à une surcharge de $1 \times 0,003 \times 100 \times \frac{2}{3} = 200$ grammes, alors que la surcharge peut arriver à 1 kg. Pour les gros fils et les câbles la question est différente. La pression du vent sur les conducteurs épais et sur les poteaux peut déterminer des efforts plus élevés que ceux provenant des surcharges. On se trouve ainsi dans la nécessité d'envisager, pour le calcul, les deux cas.

Il reste un point qui n'a pas encore été examiné. Quand les fils sont fortement surchargés, les poteaux sont soumis à un effort de compression avec *flambage*. L'appui est encastré à une extrémité. Mais l'autre bout doit-il être considéré comme libre? Ceci reviendrait à utiliser la formule d'Euler

$$P = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{E I_{\min}}{l^2} \frac{1}{K}$$

dans laquelle P désigne la charge provoquant la rupture du poteau, E le coefficient d'élasticité, I le plus petit moment d'inertie équatorial¹⁸⁾, l la longueur libre et K le coefficient de sécurité. Pour une section circulaire, le moment d'inertie équatorial vaut $\frac{\pi d^4}{64}$, et E ,

¹⁸⁾ Dans notre étude sur la détermination de la longueur des portées, nous avons écrit par erreur le plus petit moment d'inertie polaire.

pour les résineux peut être évalué à 108 000 en moyenne. Un poteau de 8 m, d'un diamètre de 15 cm à mi-hauteur du sol, peut supporter suivant la formule ci-dessus, la limite d'élasticité valant approximativement le $\frac{1}{3}$ de la charge de rupture, soit 160 kg/cm²:

$$P = \frac{\pi^2}{12} \times \frac{108\,000 \times 2485}{600^2} = 613 \text{ kg.}$$

Il faut déduire de ce nombre le poids de la partie libre du poteau et de l'armement, de sorte qu'on ne peut compter que sur une résistance nette de 490 kg. Or, un fil de bronze de 3 mm avec sa surcharge de 1 kg pèse dans une portée de 40 m 42,52 kg.

Un poteau de 8 m, d'après la formule ci-dessus, ne supporterait que $\frac{490}{42,5} = 11 \text{ fils.}$

Ce nombre de fils ne correspond pas aux expériences faites. Entre Suhr et Mellingen, il existe un tronçon de ligne où il y a 62 fils interurbains montés sur deux poteaux et une portée moyenne de 37 mètres; entre Winterthur et Sägemühle, il y a une ligne de 60 fils interurbains montés sur trois poteaux. À Montana sur Sierre, il existe encore une ligne de 38 fils de bronze de 2 mm, montés sur poteaux simples (portées de 40 mètres). Cette dernière ligne existe depuis de nombreuses années et n'a pas été endommagée malgré les fortes chutes de neige qui surviennent chaque hiver à cette altitude. Le 20 janvier 1910 on a mesuré 700 gr de neige humide par mètre de fil de bronze de 2 mm à Montana, ce qui représente par poteau simple une charge de 1106 kg et avec le poteau et l'armement au moins 1200 kg.

L'extrémité du poteau ne peut donc pas être considérée comme libre. Le poteau et les fils sont attachés en un grand nombre de points. Quand les conducteurs sont très fortement surchargés, leur tension de chaque côté de l'appui est considérable. Le poteau est comme maintenu en place. Un déplacement à gauche ou à droite, dans le sens de la ligne ne peut se produire qu'en donnant naissance à de fortes réactions. Le cas de Montana est typique, car les fils étant tendus sur des poteaux simples, ceux-ci peuvent plus facilement se déplacer dans le sens perpendiculaire à la ligne.

Pour tenir compte de l'attache du poteau, il faut donc considérer celui-ci comme encastré d'un côté et demi-libre au sommet ce qui revient à utiliser la formule d'Euler

$$P = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{EI_{\min}}{l^2} \frac{1}{K} = \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{EI_{\min}}{l^2} \frac{1}{K} \quad (8)$$

On trouve ainsi pour un poteau de 8 m une charge maximale de compression de 1226 kg.

Une question que nous aimerais voir modifiée à propos de la révision projetée est celle du coefficient de réduction de la pression du vent sur les surfaces circulaires. Actuellement ce coefficient est de $\frac{7}{10}$, valeur comprise entre celle de $\frac{2}{3}$ résultant de la formule Newton et celle de 0,785 donnée par la formule v. Lössl.

Dans les nouvelles prescriptions de l'Association des électriciens allemands, le dit coefficient a été abaissé à $\frac{5}{10}$ pour les fils. Voici la justification de cette mesure d'après l'Elektrotechnische Zeitschrift (page 1156 de 1913). „D'après le calcul des efforts provoqués sur les fils par la pression du vent sur la base des prescriptions actuelles, des conducteurs en cuivre de 35 et 50 millimètres carrés de section devraient être écartés d'environ 60° de leur position de repos. Des écarts supérieurs à 25° n'ont cependant pas été observés en pratique. Cette divergence entre les résultats déduits de la théorie et ceux de l'expérience repose sur l'inexactitude des bases du calcul. D'après des essais très complets, exécutés de divers côtés indépendamment les uns des autres, essais qui sont concordants, (Rebora, Atti dell' Assoc. Elettr. Ital. Mai—Juni 1908; Essais de Göttingen voir Hütte 1911, 1^{re} partie, page 376; Bowie, Electr. World, 48 vol. 1906 page 606; Krohne E. T. Z. 1902 page 593), on a constaté sur les corps cylindriques des pressions n'excédant pas 65 kg/m² pour une vitesse du vent de 33 mètres à la seconde. Cette pression donne une déviation de 50° environ qui est encore bien supérieure à celles qu'on a constatées en pratique. Ces résultats parlent en faveur d'une réduction du coefficient 0,7

à 0,5 pour la convexité des surfaces frappées. La commission a donc été de l'avis que cette réduction était d'autant plus justifiée que la valeur usuelle de 0,7 n'a pas une base expérimentale mais repose sur une hypothèse. En outre il faut prendre en considération que le vent ne peut frapper en même temps et avec la même force toutes les parties d'une ligne aérienne.“

En résumé, on devrait, à notre avis, établir pour le régime normal, les règles suivantes, en ce qui concerne le calcul des supports:

Article 29.

1. En état normal d'exploitation de la ligne, les appuis doivent résister, la charge admissible ne devant pas excéder la limite d'élasticité, aux efforts résultant des circonstances ci-après:

- a) *En cas de vent, à la pression horizontale de 100 kg par m² de surface plane ou 70 kg par m² de section longitudinale des pièces à section circulaire, exercée dans le sens le plus défavorable à la ligne à la température de -20° C; la tension des fils atteint le 1/5 de la charge de rupture, ou bien*
- b) *En cas de surcharge, à la pression verticale de celle-ci, la surcharge maximale étant déterminée par les offices de contrôle d'après des essais faits périodiquement; la tension des fils atteint leur limite d'élasticité.*

Pour le calcul des efforts dus à la pression du vent sur les fils, ceux-ci doivent être considérés comme rigides. La pression qu'ils subissent est de 50 kg par m² de section droite.

Les parties de supports soumises à la compression doivent offrir une sécurité de 1 au flambage si, d'après la formule de Tetmayer,

$$\lambda = \frac{l}{r} = \frac{\text{longueur libre en cm}}{\text{rayon de giration}}$$

est inférieur à 105 pour le fer profilé, à 90 pour l'acier, à 80 pour la fonte et à 100 pour le bois sec. Si λ est supérieur aux valeurs indiquées ci-dessus, la charge sera calculée suivant la formule d'Euler

$$P = \pi^2 \frac{EI_{\min}}{l^2}$$

On doit prendre pour E les valeurs suivantes se rapportant au cm²

<i>fer forgé:</i>	<i>2 000 000</i>
<i>fer fondu:</i>	<i>2 150 000</i>
<i>acier:</i>	<i>2 250 000</i>
<i>fonte:</i>	<i>1 000 000</i>
<i>bois sec:</i>	<i>100 000</i>

Voyons quels seraient les effets pratiques de ces nouvelles dispositions. Les angles, on l'a vu, seraient un peu plus solidement établis. En alignement droit, la charge d'un poteau simple serait limitée à 16 fils de bronze ou de fer de 3 mm ou à 24 fils de 2 mm, ou 32 fils de 1,5 mm, par la pression du vent dans la portée de 40 mètres. On peut solidariser au moyen d'un treillis les poteaux doubles et obtenir une résistance telle que l'action du vent ne soit plus prépondérante pour les lignes montées sur poteaux jumelés. En revanche la surcharge limiterait la capacité d'une ligne à poteaux doubles à 26 fils de bronze ou fer de 3 mm par poteau, c'est-à-dire à 52 fils par paire de poteaux, avec des portées de 40 mètres. Avec des portées de 35 mètres la capacité serait augmentée à 60 fils de 3 mm. Au-delà, il y aurait danger de rupture par flambage.

Le chiffre de 16 fils de 3 mm imposé à un poteau simple par la pression de 100 kg/m² provenant du vent paraît bien répondre aux expériences faites, des lignes simples de 14—16 fils ont résisté aux pressions du vent, même avec des portées de 50 mètres. C'est que la pression du vent n'a que très rarement atteint ce maximum en Suisse, si tant est qu'elle y est parvenue. Le formidable ouragan qui a ravagé la Suisse centrale le 5 mai 1916 avait

une vitesse de 80 km à l'heure soit 60 kg/m^2 . Le vent n'agit pas toujours perpendiculairement à la ligne et diminue avec le sinus de l'angle que fait la direction du vent avec la ligne. Les grands pays comme la France ou l'Allemagne, qui sont des pays de plaine, admettent des pressions plus élevées, soit 120 et 125 kg. La prudence ne permet pas de descendre en dessous des 100 kg, sinon l'on risquerait que beaucoup de poteaux attaqués par la pourriture tombent par une violente tempête.

Ces nouvelles dispositions auraient enfin une autre conséquence : Comme la longueur de la portée ne dépendrait que de la résistance mécanique du fil et de l'importance de la pression du vent ou du poids des surcharges sur les fils, rien n'empêcherait les entreprises industrielles, qui n'ont pas à compter avec un grand nombre de fils, de construire leurs lignes avec des portées plus longues. L'Administration elle-même aurait d'après ces règles le droit d'user de cette faculté, lorsque le diamètre des fils le permettait, pour des lignes qui, selon toutes prévisions, n'ont aucun développement en perspective. Toutes les lignes à faible et à fort courant seraient ainsi placées sur le même pied au point de vue des calculs pour l'état d'exploitation.

2. Hypothèse d'une rupture de ligne.

Une rupture de ligne est toujours possible, aussi cette éventualité doit-elle être envisagée par les prescriptions fédérales. Les mesures préventives prévues dans les prescriptions de 1899 et de 1908 sont toutefois très différentes. On y perçoit les difficultés de réglementer cette question. Voyons d'abord ce qu'on a fait dans ce domaine chez nous et dans l'un ou l'autre des grands pays voisins. Cet examen nous sera de quelque utilité pour la recherche de la solution de ce problème qui est plus pratique que théorique.

Prescriptions de 1899. Les lignes à faible courant n'étaient soumises à aucune réglementation dans l'hypothèse d'une rupture de ligne, sauf en ce qui concernait les colonnes de câbles, supports centraux et chevalets sur toit, lesquels devaient être construits de telle sorte qu'ils offrissent encore une sécurité minimale de 1 à la rupture ou au renversement, même en admettant que tous les fils fussent rompus d'un seul côté, *mais sans tenir compte du vent.*¹⁹⁾ Pour les poteaux en alignement, c'est-à-dire pour la très grande majorité des appuis aucune règle n'avait été formulée.

Les lignes à fort courant, en revanche, étaient traitées d'une manière très dure, qui a paru excessive par la suite. „Les poteaux en alignement seront calculés, disait l'article 54, de manière à offrir une sécurité minima de 1 à la rupture en admettant que tous les fils rompent d'un seul côté et en tenant compte de l'effort du vent sur les poteaux.“ Aucune différence n'était établie entre les lignes à haute tension et les lignes à basse tension. Les prescriptions étaient muettes au sujet de la valeur à donner à la traction unilatérale agissant sur le support le plus rapproché du point de rupture. Même en interprétant le plus largement cet article, c'est-à-dire en admettant comme effort de flexion plane la traction réelle, on aboutissait, si l'on voulait strictement appliquer cette règle, à des constructions extrêmement onéreuses, surtout quand il s'agissait de lignes sans grande importance économique. On allait là beaucoup trop loin, si l'on songe aussi que l'article 52 limitait déjà considérablement la longueur des portées et imposait ainsi indirectement aux lignes à fort courant avec une sécurité superflue de lourds sacrifices. Une réaction s'ensuivit.

Prescriptions de 1908. Les prescriptions de 1908 placèrent les lignes à fort et à faible courant sur un pied d'égalité complète en fixant un minimum de sécurité dans le sens de la ligne pour tous les appuis indistinctement. La traction unilatérale fut réduite au 5 % de la limite de travail admise pour les fils. Toutefois une différence de traitement, au détriment des lignes à faible courant, continuait à faire sentir ses effets, puisque la limite de travail admise pour les conducteurs des lignes à faible courant était fixée au $\frac{1}{3}$ de la charge de rupture, tandis qu'elle était ramenée au $\frac{1}{5}$ de la charge de rupture pour les lignes industrielles. Cette anomalie a été signalée déjà dans le chapitre précédent

¹⁹⁾ Art. 23.

relatif au régime d'exploitation. Dans l'hypothèse d'une rupture, les appuis des lignes télégraphiques et téléphoniques doivent être construits actuellement plus solidement que ceux des lignes à fort courant.

Nous devons encore faire remarquer que la traction unilatérale, que nous appellerons *la traction unilatérale résiduelle*, puis qu'elle n'est qu'une fraction de la tension d'exploitation, devait être composée avec l'effort du vent de 100 kg/m^2 .

Si les prescriptions de 1908 ont pu introduire un facteur de réduction de la tension des fils, c'est parce qu'elles ont tenu compte de la flèche des supports soumis à un effort de flexion plane, flèche qui réduit dans une mesure appréciable la traction originelle des fils. Il est clair que dès l'instant où il était question d'exiger une sécurité minimale des supports en cas de rupture, il convenait de prendre en considération tous les éléments du problème. La question d'une sécurité minimale sera examinée plus loin. Nous devons la réserver. Mais nous voulons faire ressortir immédiatement que la traction résiduelle fixée par les prescriptions de 1908 au 5 % de la tension de pose maximale ne répond pas à la très grande majorité des cas de la pratique. Il ne faut pas perdre de vue que la flexion des appuis provoquée par une traction unilatérale se répartit sensiblement, si le premier poteau n'est pas haubané ou contrefiché dans le sens de la ligne, sur 5 à 6 appuis consécutifs à partir du point de rupture. Dès lors la traction des fils ne s'abaisse pas aussi fortement dans la première portée que les prescriptions de 1908 ne paraissent l'admettre.

La formule Colard qui donne le rapport exact de la traction unilatérale résiduelle à la traction primitive, dans chaque portée, a pour expression :

$$T_n = T \left[1 - \left(1 + \frac{\varepsilon a}{2_n K} - \sqrt{\frac{\varepsilon a}{n K} + \frac{\varepsilon^2 a^2}{4 n^2 K^2}} \right)^n \right] \quad (9)$$

dans laquelle T_n désigne la tension cherchée dans la $n^{\text{ème}}$ portée, T , la tension unilatérale totale, c'est-à-dire la tension primitive, ε l'allongement en mètres d'un mètre de fil par Kilogramme de traction (ε pour le bronze = $78 \cdot 10^{-6}$ et pour le cuivre dur $83 \cdot 10^{-6}$), a la portée et K la flèche prise par le poteau pour 1 kg de traction, le tout exprimé en kg ou en cm. Pour la première portée après la rupture, on fait $n = 1$ dans la formule Colard.

Pour se rendre compte de la valeur de la traction résiduelle, voyons quelques cas qui se présentent couramment.

1^{er} exemple: Une ligne à basse tension de 3 fils en cuivre de 4 mm de diamètre avec des portées de 40 mètres. On emploie des poteaux de 10 mètres, la hauteur moyenne des fils au-dessus du sol est de 790 cm.

$K = 0,296$. Traction unilatérale dans la première portée = 63,8 %.

2^{me} exemple: Une ligne à haute tension de 3 fils de cuivre de 6 millimètres de diamètre avec des portées de 40 mètres. Poteaux de 12 mètres ; hauteur moyenne des fils au-dessus du sol = 960 cm, $K = 0,427$. Traction unilatérale dans la première portée = 57,5 %.

3^{me} exemple: Une ligne téléphonique de 16 fils de bronze de 2 mm de diamètre. Poteaux de 8 mètres ; hauteur moyenne des fils au dessus du sol = 612 cm, portées de 40 m.

$K = 0,2847$. Traction unilatérale dans la première portée = 63,4 %.

Avec des portées plus longues la tension résiduelle s'élève. Ainsi, dans le *1^{er} exemple*, si les portées étaient de 60 mètres, elle serait de 69 % de la tension totale. Par contre la traction résiduelle diminue avec la flexibilité des supports, c'est-à-dire avec leur longueur. Pour les pylônes métalliques K est beaucoup plus faible, le module d'élasticité E étant vingt fois plus élevé pour le fer que pour le bois.

Tout ceci montre que la traction résiduelle est beaucoup plus importante que ne le laisse supposer les prescriptions de 1908. C'est en outre une erreur de vouloir fixer

la tension unilatérale à un tant pour cent de la tension maximale admise, puisque le rapport $\frac{T_u}{T}$ change avec chaque espèce de ligne, suivant la nature, la forme et la longueur des appuis, suivant la distance des supports et la nature des fils.

En *Allemagne*, les anciennes prescriptions de l'Association des électriciens n'indiquaient aucune mesure spéciale pour la sécurité des supports dans l'hypothèse d'une rupture de la ligne. Mais les nouvelles normes²⁰⁾, qui ne s'appliquent — ne l'oubliions pas — qu'aux lignes à fort courant, ont imité nos prescriptions de 1908 et exigé également une certaine résistance des appuis dans le sens de la ligne. Toutefois on a établi une distinction dans ces prescriptions entre les supports. Ceux-ci sont classés en support de passage (Tragmaste), supports d'angle (Eckmaste), supports d'arrêt (Abspannmaste) et supports tête de ligne (Endmaste).

Pour les supports de passage (ceux qui sont en alignement ou dans des angles qui n'excèdent pas 5°), on demande que dans le sens de la ligne la résistance de l'appui équivale le $\frac{1}{4}$ de la résistance que possède le même appui dans le sens perpendiculaire à la ligne. Or pour le calcul du support dans la direction perpendiculaire au tracé, les normes prennent pour base une pression du vent de 125 kg par mètre carré de surface contre les fils (deux demi-portées) et contre l'appui. Pour les corps cylindriques il est fait une réduction, soit $\frac{5}{10}$ pour les fils et $\frac{3}{10}$ pour les poteaux. Nous ne savons pas sur quelles données on s'est appuyé pour admettre le facteur $\frac{1}{4}$. Il s'agit là sans doute d'une condition arbitraire.

En ce qui concerne les supports d'arrêt, la résistance demandée dans le sens de la ligne est égale aux $\frac{2}{3}$ de la plus forte traction des fils. Le coefficient de $\frac{2}{3}$ paraît être par contre une moyenne de la traction résiduelle obtenue avec la formule Colard, comme on peut le voir par les 4 exemples ci-devant. En outre, dans la même sens on tient compte de la pression du vent de 125 kg/m².

Les supports d'angle doivent résister aux plus hautes tractions admises pour les fils et en outre à la pression du vent de 125 kg/m².

Enfin les supports tête de ligne doivent, outre la pression du vent, soutenir la traction maximale tolérée pour les fils.

Quant aux lignes à courant faible, elles ne sont pas assujetties à des règles concernant la résistance des supports dans le sens du tracé.

En *France*, les prescriptions techniques établies pour les lignes aériennes [classées en deux catégories: basse tension (I^{re}) et haute tension (II^{me}),] ne prévoient l'hypothèse de la traction unilatérale que pour le calcul des lignes électriques servant aux tramways. Pour toutes les autres lignes cette hypothèse n'est pas admise.

Nous estimons inutile d'allonger cette étude en mentionnant ce qui se fait dans d'autres pays. Il faut simplement constater que l'hypothèse de rupture ne s'est infiltrée que graduellement dans les prescriptions techniques en Suisse d'abord, en Allemagne ensuite. La France, bien que l'arrêté ministériel réglant la matière ne date que de l'année 1910, n'a pas jugé à propos d'introduire cette notion d'une façon générale dans sa législation administrative.

Quelques considérations sur l'hypothèse de rupture.

Comme nous l'avons dit tout à l'heure, nous estimons, puisque la rupture d'une ligne rentre dans le domaine des possibilités, que les prescriptions à établir doivent déterminer les règles à adopter pour parer à un accident de ce genre. Mais il y a une profonde différence, qu'on ne peut pas contester, entre le régime d'exploitation et l'hypothèse de rupture. Les lignes exploitées doivent être solidement construites, en tenant compte de tous les facteurs atmosphériques et en utilisant rationnellement la matière.

²⁰⁾ Normalien für Freileitungen des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

Bien que toutes les lignes électriques en exploitation ne présentent pas le même danger, nous n'en devons pas moins reconnaître que le public tient aussi bien, et même davantage encore, aux communications téléphoniques et télégraphiques qui lui sont indispensables. Une ville pourra plus facilement se passer de lumière pendant une journée que de sentir complètement isolée. Lignes à faible courant comme lignes à fort courant sont au même titre des facteurs de première importance dans la vie d'une région. Un intérêt public de premier ordre exige que toutes ces lignes soient solidement établies, sans examiner lesquelles sont les plus nécessaires. Mais l'hypothèse de rupture reste toujours une hypothèse et les mesures préventives prises constituent en quelque sorte une assurance contre les accidents, qui doit être proportionnée à l'importance économique de la ligne en cause, à la gravité de l'accident provoqué par une rupture, etc. La chute d'une série de pylônes d'une grande ligne de transport peut avoir des conséquences redoutables pour le public des lieux traversés, surtout si l'une de ces tours métalliques tombe dans le voisinage d'une agglomération, ou sur une voie publique ou une voie de chemin de fer et l'obstrue. Le renversement d'un poteau en bois n'affecte déjà plus la même gravité. Seul le courant d'une ligne à haute tension montée sur poteaux en bois peut causer encore lors d'une rupture des accidents plus ou moins graves. Il faut remarquer que les lignes à basse tension sont toujours très courtes, qu'elles desservent un village ou un quartier d'une ville, que dès lors la chute d'un poteau d'une ligne à basse tension n'entraîne pas le renversement d'une série d'autres poteaux de la même ligne. L'accident est toujours limité. Pour les pylônes métalliques en fer, les tourelles en acier des grandes lignes de transport, pour les appuis en béton armé, la sécurité demandée dans le sens de la ligne est actuellement absolument insuffisante. Ce 5 % de la traction maximale admise est beaucoup trop faible, il ne présente aucune sécurité réelle en cas de rupture. Cette remarque s'étend aussi bien aux lignes sur poteaux en bois qu'à celles montées sur pylônes en fer. Pour obtenir de chaque appui la solidité voulue lui permettant de résister à une rupture de la portée adjacente, il faudrait construire des supports extrêmement coûteux. En ce qui touche les lignes télégraphiques et téléphoniques, cette méthode de construction entraînerait la ruine des administrations ou un formidable renchérissement des taxes. Et comme les lignes de cette dernière catégorie ne sont dangereuses ni par le courant qu'elles transportent ni même par la chute d'un poteau, si celui-ci ne tombe pas sur une route très fréquentée ou sur un chemin de fer, on peut dire que ce serait une folie d'envisager une méthode de construction pareille. En Suisse, l'Administration assure ses lignes contre des ruptures éventuelles en faisant usage de *supports d'arrêt*, c'est-à-dire d'appuis suffisamment forts pour résister à une rupture de ligne. Ces supports sont disposés symétriquement sur les lignes, soit tous les Kilomètres ou pour les lignes importantes tous les 10 supports. Naturellement l'emploi de supports d'arrêt est limité aux lignes possédant un certain nombre de fils dont la rupture entraînerait le renversement inévitable de l'appui. On peut donc affirmer que la règle du 5 % n'a aucun sens, elle est inefficace en cas de rupture et onéreuse quand même, puisqu'elle impose aux appuis dans le sens de la ligne une résistance qui peut être supérieure à celle exigée par les charges permanentes du régime d'exploitation et par les facteurs atmosphériques.

Avant de formuler les règles qui, à notre avis, pourraient être admises dans l'hypothèse de rupture, il n'est pas sans intérêt de jeter un rapide coup d'œil sur les causes des accidents et d'en analyser sommairement les effets.

Des causes de l'accident et des moyens préventifs pour les supprimer.

Les causes de rupture peuvent être classées en trois catégories générales, à savoir:

1. Défaits, usure ou détérioration naturelle du matériel de ligne.
2. Chutes de corps étrangers sur la ligne, tels que arbres, pierres, rochers, avalanches, etc.
3. Excès d'efforts provoqués par les éléments atmosphériques (surcharges et vent), actes de malveillance.

1^{re} catégorie. Les défauts du matériel et son usure normale ne peuvent pas provoquer seuls la rupture d'une ligne *régulièrement* surveillée et entretenue. Un fil affecté d'un défaut ayant échappé à la réception du matériel ou à la pose peut évidemment se rompre sous l'effet des variations de tension; mais il ne provoquera pas la rupture de la ligne si les autres conducteurs sont en bon état. Il serait bien extraordinaire que tous les fils d'une même portée fussent défectueux et se rompissent en même temps. Le risque pour cette sorte d'accidents est négligeable. Quant à l'usure et à la détérioration naturelle du matériel, ce sont surtout les poteaux qui en sont atteints. La surveillance et l'entretien réguliers de la ligne sont les moyens les plus efficaces pour prévenir des ruptures provoquées par la chute de poteaux pourris. Il ne servirait de rien de renforcer les appuis pour éviter ces accidents, car un petit nombre de poteaux étant mal surveillés, un plus grand nombre le seront encore moins bien. Les prescriptions fédérales exigent l'entretien périodique des installations et toutes les entreprises sont d'ailleurs responsables des accidents qui pourraient survenir par négligence (art. 27 de la loi fédérale concernant les installations électriques).

2^{me} catégorie. Lorsqu'on choisit le tracé d'une ligne on ne peut pas toujours éviter certains passages dangereux, surtout en montagne, où les chutes d'arbres, de pierres, de glaçons, etc, sont fréquentes. Les éboulements menacent les lignes qui coupent les pentes raides d'une vallée ou qui cotoient le pied d'un rocher. Les couloirs d'avalanche sont connus dans la contrée par les indigènes.

La chute d'un corps étranger sur la ligne cause une violente secousse et développe des efforts dynamiques aussi bien sur les fils que sur les appuis. La force vive du choc dépend du poids et de la vitesse des corps précipités sur la conduite. Généralement l'action perturbatrice dépasse de beaucoup la résistance des fils. Ceux-ci sont rompus et les appuis trop faibles dans le sens de la ligne sont couchés de proche en proche s'ils ne peuvent pas résister à la traction unilatérale qui a remplacé la tension ordinaire des fils à la température du moment. Quand les fils, dans la portée de l'accident, sont sur le point de sauter, les supports No. 1 de cette portée (voir croquis)



sont soumis à une traction qui est plus forte dans la portée 1—1. Les appuis 1. 2. 3.... ploient dans cette direction. Mais la flexion des appuis 1. 2. 3.... diminue assez rapidement à mesure qu'on s'éloigne du point de l'accident. On se trouve dans un cas analogue à celui qui a été étudié par M. Colard. A partir du 6^{me} appui la flexion est insensible. Au moment où se produit la rupture des fils les supports No. 1 sont chacun sollicités par deux forces: l'une (1—1) égale à la charge de rupture, l'autre (1—2) qu'on pourrait calculer au moyen de la formule (9) de la page 34 en faisant $T = \text{charge de rupture}$. Pour les poteaux, qui sont des appuis très flexibles, on a vu que la traction tombe d'environ 40 %. En d'autres termes, si les appuis No. 1 ne peuvent résister à une traction unilatérale valant le 40 % de la charge de rupture des fils, les poteaux seront également brisés. Admettons que ce soit le cas. Alors les fils des portées (1—2) traîneront à terre et les supports No. 2 devront supporter la traction unilatérale des portées (2—3). Or cette traction d'après la formule Colard n'est aussi qu'une fraction de la tension de pose à la température du moment, de l'accident. Nous voyons ainsi que si les supports de la ligne sont en état de supporter le 40 % de la charge de rupture, l'accident se limite à une rupture des fils; si les appuis ne peuvent résister qu'à une traction résiduelle unilatérale égale aux 60 % de la tension de pose maximale, soit aux 60 % du $1/5$ de la charge de rupture, l'accident est limité à la rupture des fils et à la chute des deux poteaux No. 1.

Quand la chute du corps étranger est provoquée par la tempête, il faut ajouter à ces tractions unilatérales la pression du vent.

Il va de soi qu'on ne peut pas construire tous les appuis de cette manière ruineuse. Là où des chutes de corps ne sont pas à redouter, ces dépenses seraient d'ailleurs inutiles. Il faudra se contenter d'en établir un certain nombre à tous les points dangereux, par

exemple de chaque côté d'un couloir d'avalanche ou avant et après un rocher, à l'entrée et à la sortie d'une forêt, etc. Si cette dernière est longue, on renforcera aussi un certain nombre de poteaux intermédiaires. La tranchée peut aussi être élargie.

Les supports d'arrêt doivent donc être extrêmement solides. La résistance nécessaire, pour des lignes sur poteaux en bois, ne peut être obtenue qu'en utilisant des contrefiches. Il faut alors remarquer qu'on obtient ainsi un support rigide dont la flexion est tout-à-fait minime, en sorte qu'on ne peut plus utiliser la formule Colard. Dans la portée (1—1) on a une tension égale à la charge de rupture des fils et dans la travée (1—2) c'est la tension de pose ($\frac{1}{5}$ de la charge de rupture) qui règne. Le *support d'arrêt* No. 1 doit donc résister *au moins* aux $\frac{4}{5}$ de la charge de rupture des fils, et à la pression du vent. Nous adopterons la charge de rupture pleine au lieu des $\frac{4}{5}$. La sécurité d'un support d'arrêt doit être supérieure à 2 afin de laisser intacte l'élasticité du matériel.

Quand la rupture se produit en un point non prévu, entre deux supports de passage, ceux-ci sont tous couchés jusqu'au moment où l'accident, en se propageant, atteindra un appui résistant aux 60 %, du $\frac{1}{5}$ de la charge de rupture (disons au $\frac{1}{5}$ plein pour tenir compte des supports métalliques. Nous appellerons les supports qui possèderont cette résistance des *supports renforcés*.

Nous aurons ainsi des supports d'arrêt à tous les points dangereux, à toutes les traversées de voies ferrées et de routes à circulation intense, aux longues traversées de cours d'eau et précipices et entre ces points de distance en distance des supports renforcés. Les supports d'arrêt résisteront au vent et à une traction unilatérale égale à la charge de rupture des fils; les support renforcés supporteront, outre le vent, une traction unilatérale égale au $\frac{1}{5}$ de la charge de rupture. Les supports d'arrêt seront ainsi cinq fois plus solides que les supports renforcés.

Cette disposition nous paraît, au double point de vue économique et de la stabilité générale, la plus rationnelle. Elle permet de concentrer la matière sur les points où les dangers sont les plus grands et de décharger les supports dans les parages où la ligne ne court aucun risque.

3^{me} catégorie. Les nouvelles prescriptions devront prendre en considération, comme nous l'avons vu, pour le régime d'exploitation normale, tous les éléments atmosphériques, surcharges diverses et vent, en majorant encore leurs plus grandes valeurs connues. Les risques d'accidents de cette nature seront par conséquent très réduits. Il pourrait naturellement se faire — c'est une supposition qu'on peut formuler en tout temps — que des surcharges encore plus fortes que les maxima admis surviennent et détruisent les lignes. On assurera aussi celles-ci d'une manière générale par l'emploi de supports renforcés répartis régulièrement le long de la ligne de distance en distance.

Le nombre des supports renforcés variera avec l'importance économique de la ligne, avec les dangers qu'elle présente, avec sa situation. Pour de grandes lignes de transport sur pylônes métalliques, les supports renforcés seront plus rapprochés, on en mettra un tous les 3—400 mètres au plus. Pour les petites lignes à faible courant, on se contentera d'en placer un par kilomètre.

Avant de clôturer ce chapitre, nous avons encore à examiner les effets des surcharges et à nous rendre compte s'il convient de modifier l'opinion que nous nous sommes faite jusqu'ici du rôle et de la résistance des supports. Nous nous occuperons des trois espèces de surcharges les plus nocives: neige, glace (givre, grésil et dépôts semblables) et vent.

Neige. Quand il se produit une chute de neige extraordinaire et que tous les fils d'une portée se rompent tout-à-coup, la ligne est violemment secouée sur un certain nombre de portées. Les fils se déchargent sur ce tronçon et reprennent la tension de pose ramenée à la température du moment, c'est-à-dire à 0°, environ. La neige qui tombe par quelques degrés au-dessous de 0°, appellée communément la neige sèche, n'est pas dangereuse pour les fils, car elle ne s'y attache qu'en très petite quantité. Comme un vent même peu violent détruit les cordons de neige, il ne peut pas être question de composer l'effort

du vent avec la traction résiduelle. On doit donc admettre que celle-ci agit seule, sans vent, son maximum vaut le $\frac{1}{5}$ de la charge de rupture.

Givre, grésil, glace. Cette espèce de surcharge est plus tenace sur les fils que la neige. Une rupture de ligne ne la fait tomber que par endroits, dans les premières portées. La tension ne revient pas à l'état normal existant avant la formation de la surcharge; la tension résiduelle est donc plus élevée aussi. Mais il faut signaler que les ruptures de ligne par surcharge de givre ou de glace sont rares. Elles ne se produisent qu'en montagne, dans les Alpes et le Jura. La formation de cette surcharge est généralement assez lente, elle dure parfois plusieurs jours. Dans les contrées habitées on a le temps d'envoyer des ouvriers pourvus de perches pour briser les dépôts. De toutes les surcharges, celle du givre est la plus lourde, mais elle est moins à craindre que la neige molle qui en quelques heures peut faire beaucoup de mal. D'ailleurs les lignes suisses, dans leur grande majorité souffrent surtout des dégâts causés par la neige. Ce serait pousser à d'inutiles dépenses que de soumettre les nombreuses lignes de la plaine aux mêmes conditions que les lignes certainement beaucoup moins nombreuses des montagnes. Pour ces dernières on doit prévoir un raccourcissement des portées ou un renforcement des appuis comme il en est déjà question dans l'alinéa 2 de l'article 30 actuel (voir page 5).

Vent. La pression du vent a été admise en Suisse à 100 kg par mètre carré. Comme ce maximum a donné jusqu'ici de bons résultats pour toutes les constructions, une ligne en bon état d'exploitation n'a rien à craindre. Il n'est donc pas nécessaire de prendre d'autres mesures vis-à-vis de cet élément, surtout pour les lignes sur pylônes métalliques ou pour les lignes avec poteaux sur socles. Quant à la chute éventuelle d'un poteau attaqué par la pourriture, elle peut entraîner une rupture de la ligne dans certaines circonstances.

Pour les fils massifs jusqu'à 8 mm de diamètre, la surcharge produite par le vent est bien inférieure à celle de la neige, la longueur de la portée restant la même dans les deux cas. Ainsi pour un conducteur de 6 mm la surcharge due à la pression maximale du vent n'est encore que de 300 grammes par mètre courant. Mais si un appui tombe la portée du fil est doublée.

En appelant p'_1 la surcharge (y compris le poids propre du fil) dans une portée a , p le poids propre du fil, T'_0 la traction maximale et T_0 la tension de pose, ε le coefficient élastique du fil et s la section, on a la relation

$$p'_1 = T'_0 \sqrt{24 \frac{\varepsilon}{s} \cdot \frac{1}{a^2} (T'_0 - T_0) + \frac{p^2}{T_0^2}}$$

Dans une portée $2a$, la tension du fil restant la même, celui-ci peut supporter une surcharge p'_2 et il vient

$$p'_2 = T'_0 \sqrt{24 \frac{\varepsilon}{s} \cdot \frac{1}{4a^2} (T'_0 - T_0) + \frac{p^2}{T_0^2}}$$

En élevant ces équations au carré, en les divisant l'une par l'autre et en simplifiant, on trouve

$$p'_2 = \frac{1}{2} p'_1$$

Donc en doublant la portée le fil ne supporte plus que la moitié de la surcharge.

Un fil pouvant retenir une surcharge de 1 kg dans la portée critique n'en supportera plus que 500 gr dans le cas de la suppression d'un appui intermédiaire. Comme la pression du vent n'atteint pas cette valeur par mètre courant, le fil sera encore en état de supporter une petite charge concentrée. Pour le fil de bronze de 2 mm, cette charge serait d'environ 20 kg, de sorte qu'une ligne de 5—6 fils de bronze 2 mm résisterait à la chute d'un poteau par le vent. L'emploi de supports renforcés est de nouveau indiqué comme moyen de précaution. Une surveillance constante et périodique des poteaux constitue cependant la meilleure garantie.

De la limite de travail des supports d'arrêt et des supports tête de ligne.

Si l'on veut assurer les lignes contre une rupture éventuelle et en même temps protéger les voies de circulation, il faut donc établir une distinction entre les supports des lignes, suivant leurs fonctions, comme l'usage s'en est introduit dans l'administration des télégraphes suisses depuis de nombreuses années et comme l'ont prescrit les électriques allemands dans leurs dernières „normes“. Cette distinction permet d'établir la majorité des supports d'une manière économique et sauvegarde cependant l'ensemble d'un réseau contre des catastrophes possibles.

Le régime d'exploitation détermine les conditions pour le calcul des *supports de passage* et des *supports tête de ligne*. Les supports de passage et tête de ligne doivent résister à tous les efforts provoqués par les variations de température, par le vent et les surcharges. La limite de travail se confond avec la limite d'élasticité. En ce qui concerne les supports d'arrêt et les supports renforcés, nous avons vu à quels efforts ils doivent résister.

Nous ajouterons cependant qu'en raison de l'importante fonction des supports tête de ligne (supports centraux, colonnes de câbles, départs de transformateurs, etc.) et de leur situation fréquente dans les agglomérations, il faudrait assimiler ces supports aux supports d'arrêt. De cette manière nous obtenons donc la classification suivante entre les supports:

Espèces de supports:

1. Supports tête de ligne et supports d'arrêt: Vent de 100 kg/m² + traction unilatérale égale à la charge de rupture des fils.
2. Supports renforcés. Vent de 100 kg/m² + traction unilatérale égale au $\frac{1}{5}$ de la charge de rupture.
3. Supports de passage. Charges permanentes.

Efforts à supporter:

Les supports des catégories 1 et 2 doivent naturellement, satisfaire aussi aux conditions de la catégorie 3 (charges permanentes).

La limite de travail pour les supports des deux premières catégories doit être choisie de telle sorte qu'on obtienne un coefficient de sécurité donnant toute confiance mais aussi dénué d'exagération. On ne peut pas jongler avec les coefficients de sécurité, les dépenses qui en résultent pour des milliers de supports constituent des sommes fort élevées. C'est, ce doit être le but d'une nouvelle révision des prescriptions de chercher à condenser la matière le long du tracé où il la faut, et de l'épargner où cela est possible.

Les nouvelles prescriptions allemandes nous paraissent avoir déterminé le coefficient de sécurité avec beaucoup de discernement. Voici ce qu'elles disent:

„La charge pratique pour les constructions en fer ne doit pas excéder en cas de compression ou de flexion 1500 kg/cm² (tension normale), en cas de cisaillement 1200 kg/cm² pour les rivets et 750 kg/cm² pour les boulons, et pour la pression de frottement le double des valeurs ci-dessus.“

D'autre part les mêmes prescriptions limitent la charge pratique à 110 kg pour le bois imprégné ou pour les bois non imprégnés particulièrement résistants (mélèze, chataigner, etc.) et à 80 kg pour les autres bois.

Ces valeurs se tiennent comme on le voit, un peu en-dessous de la limite d'élasticité et donnent un coefficient de sécurité compris entre 2 et 3 pour le fer et 4 pour le bois.

Proposition.

Nous résumerons les principes exposés ci-devant dans la proposition suivante:

Article 29².

2. Pour assurer la ligne contre une rupture il y a lieu de prévoir l'utilisation:
 - a) de supports d'arrêt à tous les passages dangereux de la ligne, aux traversées de chemins de fer, de routes à circulation très intense et dans les portées inévitables d'une longueur supérieure au maximum prévu à l'article 30 chiffre a,

b) de supports renforcés à raison d'un support par demi-kilomètre au maximum pour les lignes à fort courant ou d'un support par kilomètre au maximum pour les lignes à faible courant.

Les supports tête de ligne sont considérés comme des supports d'arrêt.

Les supports d'arrêt doivent résister à une traction unilatérale égale à la charge de rupture des fils et en outre à la pression du vent de 100 kg par mètre carré de surface plane dans le sens le plus défavorable à la ligne. Cette pression est réduite de moitié pour les fils et d'un tiers pour les poteaux en bois et montants ou pièces tubulaires.

La charge pratique admissible ne devra pas excéder 110 kg par centimètre carré pour le bois imprégné ou le bois résistant non imprégné (mélèzes, chataigniers, etc.). Pour le fer la charge pratique maximale est fixée à

*1500 kg/cm² (tension normale) en cas de traction, de compression ou de flexion :
1200 kg/cm² pour les rivets, en cas de cisaillement,
750 kg/cm² " " boulons " " "*

On veillera à ce que les pièces comprimées résistent également au flambage.

L'article 33.

Cet article prévoit que tous les supports en fer et *en bois* doivent être calculés pour le nombre maximum des fils. Lorsque celui-ci est atteint, il est défendu de fixer d'autres fils aux supports, même provisoirement. Cette disposition, qui a été introduite dans la bonne intention de prohiber l'emploi de moyens de fortune pour augmenter artificiellement et dangereusement la capacité normale d'un chevalet sur toit ou d'un support central, a donné lieu à des interprétations abusives qu'il est urgent de supprimer.

Nous admettons qu'il est parfaitement fondé de défendre l'adjonction de nouveaux fils, même provisoirement, sur une colonne ou un pylône métallique, dont la capacité pour laquelle le fût a été calculé est totalement absorbée. La capacité d'un support central, d'un chevalet sur toit, d'une colonne est connue. On ne peut pas augmenter le nombre des isolateurs d'un support métallique, une fois la capacité normale atteinte, sans modifier considérablement la construction. Mais l'article 29 est formel. Il détermine exactement les conditions de résistance de chaque support. Tout appui, calculé pour une capacité donnée, sur lequel auront été tirés trop de fils, ne répondra plus aux prescriptions de l'article 29. Nous estimons donc que l'article 33 pourrait être simplement supprimé.

Pour les appuis en bois, il prête le flanc à des critiques malheureusement très fondées, sur lesquelles nous n'insisterons pas. D'après les prescriptions actuelles un poteau simple peut supporter 10 fils de bronze de 3 mm. C'est la capacité d'une ligne interurbaine à poteaux simples. Or d'après l'art. 33 tous les angles d'une ligne de 4 fils doivent être construits comme si elle avait 10 fils. Il en résulte l'adjonction prématuée d'une quantité de traverses de renforcement inutiles, traverses pouvant parfaitement être posées lorsqu'on procéderait à la pose de nouveaux circuits. Une ligne sur poteaux doubles (jumelés) avec 16 fils doit posséder actuellement les mêmes renforcements transversaux que si elle portait 28 fils.

Tous les efforts de la technique des lignes doivent tendre à la réalisation du principe que la résistance d'un appui réponde exactement à sa charge à un moment quelconque et que l'augmentation nécessaire de la résistance de l'appui ne s'obtienne que par l'adjonction de nouveaux matériaux, sans procéder à aucune reconstruction ou transformation.

Ce principe fondamental diminuera dans une proportion considérable le nombre des reconstructions et la main d'œuvre nécessaire à ces transformations. Il évitera la pose sur les lignes d'énormes quantités de fers, qui ne seraient peut-être devenus nécessaires que de nombreuses années plus tard.

On comprendra facilement toute l'importance économique de ce nouveau principe pour une administration télégraphique et téléphonique. Il n'est applicable, il est vrai, qu'aux

lignes sur poteaux en bois. Mais ces appuis sont la très grande majorité. Ainsi quand une ligne sur poteaux simples aura atteint le nombre de conducteurs maximum, l'appui sera jumelé, au moyen d'un second poteau planté à une certaine distance du premier. Aucun renforcement ne sera fixé entre ces deux poteaux jusqu'au moment où la capacité de deux simples sera dépassée. On procèdera, alors seulement à la pose du premier renforcement. Lorsque le nombre des fils sera tel que la résistance de l'appui ainsi constitué sera insuffisante, on fixera le second renforcement et ainsi de suite. Les renforcements seront toujours strictement indéformables. Il faudra rechercher toutes les solutions de construction permettant de réduire le plus possible le matériel dont la présence n'est pas immédiatement nécessaire sur la ligne. L'article 33 est en contradiction avec le principe énoncé.

Nous avons la profonde conviction que sans compromettre la sécurité des lignes, on peut par une révision des prescriptions fédérales actuelles faire d'importantes économies dans la construction des lignes. Nous croyons remplir, dans les circonstances difficiles actuelles, un devoir patriotique en signalant aux autorités compétentes l'avantage incontestable qu'il y aurait à introduire une large réforme dans le service des lignes aériennes de notre administration, service, qui nous paraît au surplus, insuffisamment organisé.

Miscellanea.

Inbetriebsetzung von schweizerischen Starkstromanlagen. (Mitgeteilt vom Starkstrominspektorat des S. E. V.) In der Zeit vom 20. Januar bis 20. Februar 1917 sind dem Starkstrominspektorat folgende wichtigere Anlagen als betriebsbereit gemeldet worden:

Hochspannungsfreileitungen:

Aargauisches Elektrizitätswerk, Aarau. Hochspannungszuleitung zur Transformatorenstation Schmid-Kappeler & Co., Mellingen (Aargau). Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden. Hochspannungsleitung zur Transformatorenstation in der Gemeinde Sarmenstorf. Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden. Leitung nach dem Weiler Reussegg (Gemeinde Meienberg). Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

Elektrizitätswerk Altdorf. Leitung zur Transformatorenstation bei der Eisenbahnerkolonie in Erstfeld. Drehstrom, 14300 Volt, 48 Perioden.

Bernische Kraftwerke A.-G., Betriebsleitung Bern. Leitung zur Transformatorenstation bei Lützelflüh. Drehstrom, 16000 Volt (vorläufig 4000 V.), 40 Perioden.

Elektrizitätswerk Brugg. Leitung zur Transformatorenstation nordöstlich vom Schloss Habsburg. Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

Elektra Goldach, Goldach (Kt. St. Gallen). Leitung zur Transformatorenstation Goldach II (Stickfabrik Union) (teilweise Parallelführung mit einer Niederspannungsleitung). Drehstrom, 10000 Volt, 50 Perioden.

Verwaltungskommission der Gemeindewerke Höngg. Leitung zur neu projektierten Transformatorenstation im „Holbrig“, Höngg. Drehstrom, 2200 Volt, 45 Perioden.

Laufenthaler Kraftwerke A.-G., Laufen. Leitung nach der Transformatorenstation der Holzstoff- und Papierfabrik A.-G., Zwingen. Drehstrom, 2000 Volt, 50 Perioden. Hochspannungszweileitung von Stange No. 20 der Leitung Fabrik Dittingen-Fichtenhöfe-Wahlen nach Laufen. Drehstrom, 2000 Volt, 50 Perioden.

Elektra Mettauertal und Umgebung, Mettau (Bez. Laufenburg). Leitung zur Transformatorenstation Reuental. Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

St. Gallisch-Appenzellische Kraftwerke A.-G., St. Gallen. Leitung von Gitzbühl-Lutzenberg über Gmeindli nach Bühli-Wolfhalden. Drehstrom, 10000 Volt, 50 Perioden. Leitung von der Neumühle bei Uznach nach dem Aeule bei Ernetswil. Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

Elektrizitätswerke des Kantons Zürich, Zürich. Leitungen nach Bossikon (Gemeinde Hinwil) und Sulz-Dinhard. Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

Schalt- und Transformatorenstationen.

Aargauisches Elektrizitätswerk, Aarau. Stationen bei der Fabrik Schmid-Kappeler & Co., Mellingen, in Sarmenstorf und Reussegg (Bez. Muri).

Elektrizitätswerk der Stadt Aarau. Station für die Spinnerei Oboussier, Buchs.

Elektrizitätswerk Altdorf. Station bei der Eisenbahnerkolonie in Erstfeld.

Bernische Kraftwerke A.-G., Betriebsleitung Bern. Stangen-Transformatorenstation in der Bleiche bei Lützelflüh.

Elektrizitätsgenossenschaft Bilstein (Gemeinde Langenbruck). Stangen-Transformatorenstation auf Bilstein (Gemeinde Langenbruck).