

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 28 (1937)
Heft: 10

Artikel: Les vibrations des lignes électriques aériennes et les moyens d'amortissement et de contrôle
Autor: Jaquet, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058729>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

Die selbsterregte Spannung ist klein, da sie nur die Verlustspannung zu decken hat. Sie tritt neben der Netzspannung kaum in Erscheinung. Demgegenüber ist der Fremdstrom relativ gross, weil er nicht durch Induktivitäten gehemmt ist. Er bewirkt eine erhebliche Verzerrung des Netzstromes. Geht der Fremdstrom durch Null, so haben Netzstrom und Netzspannung normale Grösse. Erreicht der Fremdstrom seinen Amplitudenwert, so findet der Netzstrom gesättigtes Eisen vor, der magnetische Widerstand ist für ihn kleiner und seine Stromamplitude wird grösser. Andererseits wird seine Spannungsamplitude kleiner. Innert der Fremd-

stromperiode ändert der Netzstrom von normalem Wert auf ein Maximum, während die Netzspannung von normalem auf minimalen Wert ändert. Der Fremdstrom ist die Grundwelle und der Netzstrom die Oberwelle des zusammengesetzten Stromes (Fig. 7). Wie in der Fussnote ¹⁾ an einem konkreten Beispiel gezeigt ist, ist die Fremdfrequenz klein, ungefähr in der Nähe von 1/s. Der Fremdstrom bewirkt also für sich sowohl geringe Eisenverluste als auch geringe Reaktanzspannungen. Der Fremdstrom geht demnach auch in der Bildung der Frequenz den Weg des geringsten Widerstandes.

Les vibrations des lignes électriques aériennes et les moyens d'amortissement et de contrôle.

Par E. Jaquet, Bâle.

621.315.056.3

L'auteur donne une explication physique simple de la formation des vibrations des conducteurs et montre comment calculer approximativement la fréquence de ces vibrations. Il décrit ensuite le compteur d'oscillations Jaquet qui permet de lire sur un cadran le nombre de vibrations du conducteur. Ce nombre est un critérium du danger auquel le conducteur est exposé du fait des vibrations.

Es wird für das Entstehen der Leiterschwingungen eine einfache physikalische Erklärung gegeben und gezeigt, wie man die Schwingungsfrequenz angenähert berechnen kann. Hierauf wird der Schwingungszähler Jaquet beschrieben, der erlaubt, die Zahl der ausgeführten Leiterschwingungen auf einem Zifferblatt abzulesen. Die Zahl der Schwingungen gibt ein Kriterium der Gefährdung der Leiter durch die Schwingungen.

Les vibrations des lignes électriques aériennes attirent depuis quelques années déjà l'attention des techniciens d'Europe et d'Amérique parce qu'il est arrivé à plusieurs reprises que des câbles se sont rompus à la suite de fatigue par vibrations. Ces câbles vibrent dans un plan vertical avec des fréquences pouvant s'élever jusqu'à 60, même jusqu'à 100 par seconde dans des cas spécialement défavorables. On s'explique ce phénomène de la façon suivante:

Lorsque le vent souffle horizontalement contre un câble, des tourbillons se détachent périodiquement de la partie supérieure et inférieure du profil, formant derrière le câble la traînée de tourbillons de *v. Kármán*, comme la figure 1 le représente schématiquement. On sait que les deux séries sont décalées d'une demi-période, de sorte que l'on peut conclure que les tourbillons naissent avec la même

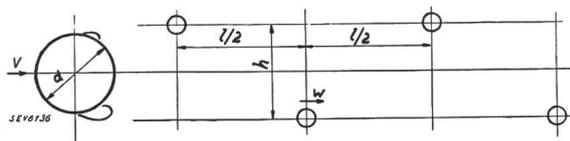


Fig. 1.
Série de tourbillons (schématique).

constante de phase. La formation unilatérale d'un tourbillon correspond à une asymétrie aérodynamique exposant le câble à une force périodique supplémentaire, dirigée approximativement dans le sens de la verticale. Il y a résonance lorsque cette fréquence coïncide plus ou moins avec une des fréquences propres du câble et les vibrations qui en résultent peuvent acquérir des amplitudes de quelques cm.

On peut déterminer, au moins approximativement, la fréquence et la distance entre deux nœuds. Pour simplifier le calcul supposons un câble à profil circulaire avec un diamètre *d* exposé au vent soufflant avec une vitesse constante *v*. Soit *h* la distance entre les deux séries de tourbillons et *l* la distance entre deux tourbillons de la même série. La condition de stabilité de *v. Kármán* exige que

$$h/l = 0,281 \quad (1)$$

Les tourbillons s'éloignent du câble avec une vitesse

$$w = v - u \quad (2)$$

v. Kármán et *Rubach* ¹⁾ ont trouvé d'après leurs essais avec des profils circulaires lisses les relations suivantes, ne dépendant que du profil tant que la résistance aérodynamique peut s'exprimer par une formule contenant la vitesse au carré:

$$u/v = 0,14; \quad l/d = 4,3 \quad (3)$$

On déduit de (1) et (3) la relation, confirmée également par l'expérience:

$$h/d = 1,21 \quad (4)$$

ainsi que la vitesse d'éloignement:

$$w = v \left(1 - \frac{u}{v}\right) = 0,86 v \quad (5)$$

Pendant la période *T* tout le système des tourbillons se déplace de la distance *l* avec une vitesse $w = l/T$, d'où résulte la fréquence des vibrations

¹⁾ *v. Kármán*, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen 1911/12 — *v. Kármán* et *Rubach*, Phys. Z., tome 13 (1912), p. 49—59 — *Fuchs-Hopf*, Aerodynamik.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{w}{l} = 0,86 \frac{v}{l} \quad (6)$$

En substituant les formules (3) dans l'équation (6) on obtient:

$$f = 0,2 \frac{v}{d} \quad (7)$$

La fréquence est par conséquent proportionnelle à la vitesse du vent et inversement proportionnelle au diamètre du câble.

Pour déterminer la distance entre deux nœuds on peut se servir des formules de la corde vibrante, supposant toujours que le câble homogène ait un profil circulaire.

Soient:

- L , la longueur du câble entre deux supports,
- λ , la distance nodale,
- σ , la tension,
- ρ , la densité.

Pour le n^{me} harmonique il résulte:

$$\text{distance nodale: } \lambda = L/n \quad (8)$$

$$\text{fréquence propre: } f_n = \frac{1}{2\lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (9)$$

En cas de résonance la fréquence f de l'excitation coïncide avec la fréquence propre f_n et l'on obtient en combinant (7) et (9)

$$\lambda = 2,5 \cdot \frac{d}{v} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (10)$$

M. G. Rocherou de la Sablière²⁾, ingénieur à la Aluminium Co. of Canada, prenant la moyenne des résultats d'une série d'essais, a trouvé une valeur un peu plus faible

$$\lambda_{\text{exp}} = 2,05 \frac{d}{v} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (11)$$

La différence du coefficient des formules théorique et empirique n'est pas étonnante, si l'on tient compte que les câbles sont composés de plusieurs fils. La valeur h/d d'un câble tressé sera plus grande que celle d'un profil lisse et par conséquent la fréquence $f < 0,2 v/d$. Notre calcul de la période des tourbillons a été établi comme si le câble restait immobile dans l'espace, mais en réalité il fait justement des oscillations qui auront certainement une influence sur la naissance des tourbillons. Mais tant que nous ne connaissons pas le mécanisme de formation et de détachement d'un tourbillon dans tous les détails, nous ne pouvons pas juger si ce mouvement fait augmenter ou diminuer la fréquence. Les

²⁾ Je dois cette communication à M. G. Gruner, ing. à Bâle. La formule employée au Canada s'exprime de la façon suivante: $\lambda = 10,5 \cdot \frac{d}{v} \sqrt{\frac{F}{G}}$; λ en pieds, d en pouces, v en pieds/min. F = traction en lbs; G = poids par unité de longueur lbs/pied d'où résulte la formule (11) en unités c.g.s.

résultats d'essais publiés par Schmitt et Behrens³⁾ ne permettent pas de tirer une conclusion nette à ce sujet.

D'autre part, les équations de la corde vibrante ne peuvent fournir qu'un résultat approximatif si on les applique pour un câble tressé dont les frottements internes⁴⁾ sont importants. Un câble aura certainement une fréquence plus faible qu'une corde de même diamètre. Il semble peu probable qu'on puisse déterminer quantitativement ces différentes influences.

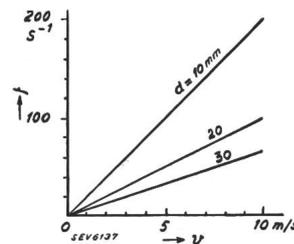


Fig. 2.

Fréquence f en fonction de la vitesse du vent v pour différents diamètres de câbles.

La fig. 2 représente la fréquence, calculée par l'équation (7) en fonction de la vitesse du vent, pour des câbles de 10, 20 et 30 mm de diamètre. Dans la fig. 3 on trouve la distance nodale λ , calculée d'après (11) pour des câbles en aluminium, poids spécifique $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$, en fonction du diamètre, pour quelques vitesses. Les traits pleins correspondent à une tension $\sigma = 9 \text{ kg/mm}^2$, les traits pointillés à $\sigma = 16 \text{ kg/mm}^2$. La fig. 4 représente égale-

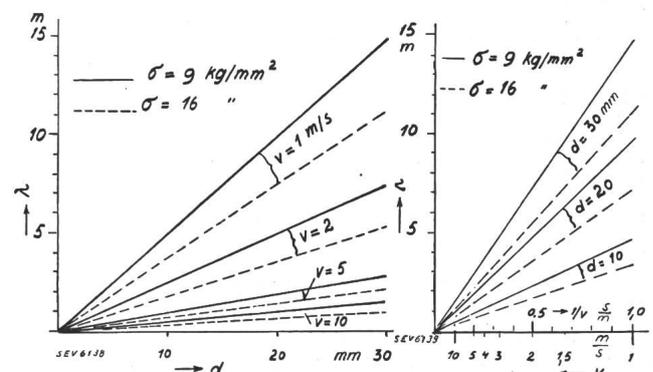


Fig. 3.

Distance nodale λ en fonction du diamètre des câbles, pour différentes vitesses du vent v et tensions σ .

Fig. 4.

Distance nodale λ en fonction de la vitesse du vent v , pour différents diamètres de câbles d et différentes tensions σ .

ment λ , mais en fonction de la vitesse du vent resp. de la valeur réciproque pour des câbles de 10, 20 et 30 mm de diamètre.

Pour supprimer, ou du moins pour amortir ces vibrations, on se sert de divers moyens. La méthode la plus connue consiste à fixer au câble une masse

³⁾ Th. Schmitt & P. Behrens, Theoret. u. exp. Untersuchungen über Seilswingungen ETZ, tome 54 (1933), p. 603.

⁴⁾ Voir ten Bosch, Der heutige Stand der Drahtseilforschung, Schweiz. Bauztg., tome 108 (1936), Nr. 9.

avec ressort ou un amortisseur à levier⁵⁾ à une distance appropriée de la pince-support. Les perturbations causées par ces amortisseurs empêchent la résonance et réduisent les amplitudes. Une autre méthode intéressante, proposée par *M. Preiswerk*⁶⁾, Neuhausen, consiste à tresser un câble creux et à introduire dans la cavité un câble dont le diamètre est plus faible que le diamètre de la cavité. En réglant la tension du câble creux et du câble intérieur on arrive à supprimer les vibrations parce qu'elles sont perturbées *in statu nascendi* sur toute la longueur, tandis que par les autres méthodes on ne fait que déplacer les nœuds et protéger de cette façon les parties à proximité des supports.

Pour se rendre compte si un câble risque une rupture ou non, il faut d'abord savoir s'il vibre ou non. Il est fort probable, d'après ce qui précède, que tous les câbles vibrent temporairement plus ou moins et il s'agit donc de mesurer l'amplitude des vibrations et leur nombre pour une durée d'observation donnée. Il existe deux appareils pour ces mesures: le *recorder* et le *compteur de vibrations Jaquet*.

Les recorders pour lignes aériennes fonctionnent selon le même principe que les recorders ordinaires. Un stylet enregistreur, commandé par un pendule horizontal inscrit les oscillations sur un papier paraffiné, déplacé par un mouvement d'horlogerie. Le graphique permet de vérifier si le câble vibre ou non, par contre il est impossible de déterminer le nombre de vibrations effectué par exemple dans 24 heures⁷⁾. Pour juger l'amplitude il est recommandable de faire, à titre de contrôle, un essai de vibration avec une amplitude connue.

La nécessité de changer les feuilles de diagramme et de remonter de temps en temps le mouvement d'horlogerie présente un gros désavantage, car ces essais durent des semaines, parfois des mois, et ce travail est coûteux, surtout s'il faut mettre la ligne hors service pendant ce temps. L'expérience a démontré que les recorders actuels ne sont pas encore assez robustes et que surtout le mécanisme d'horlogerie relativement subtil ne résiste pas assez longtemps aux vibrations en question.

Le *compteur de vibrations Jaquet*⁸⁾, muni d'aiguilles et d'un cadran, indique le nombre de vibrations effectuées. Il ne réagit que sur des oscillations dont l'amplitude dépasse $\pm 0,7$ mm. Cette limite de sensibilité inférieure a été choisie pour des raisons pratiques, les amplitudes plus faibles ne causant plus de danger réel. Environ 50 de ces compteurs se trouvent en service jusqu'à présent, de sorte qu'on ne peut pas encore dire avec certitude que

⁵⁾ Pour la construction de ces amortisseurs voir: *Schmitt & Behrens*, ETZ I. c. — *Schmitt*, Z. V. D. I. 1933, S. 52.

⁶⁾ *M. Preiswerk*, Bull. ASE 1934, No. 10, p. 252, et 1935, No. 19, p. 543.

⁷⁾ Cf. *M. Preiswerk* et *G. Dassetto*, *Conduttori antivibranti*, L'Energia Elettrica XII. 1935, fasc. 1, p. 55. — *G. Dassetto*, *Comunicazione XL Riunione ann. dell'AEI*. S. Margherita Ligure 1935.

⁸⁾ Le compteur de vibrations est fabriqué par la maison *James Jaquet S. A.* à Bâle.

cette limite est bien choisie. L'appareil est muni d'un pendule horizontal suspendu à un ressort. Sa fréquence propre relativement basse est de l'ordre de 3 par seconde. Le mouvement relatif entre la masse du pendule et le boîtier est transmis à l'aiguille par un mécanisme, représenté sur la figure 5, ne contenant aucun ressort additionnel. Le pendule A logé dans le cadre B est suspendu au ressort C. Une came D en acier trempé, soudée dans la masse du pendule, glisse entre deux butées fixées dans la fourchette E. Lorsque la came vibre dans un plan vertical, la fourchette exécute des oscillations horizontales, agissant par ses deux extrémités sur une roue à rochet F en la déplaçant d'une dent à chaque période complète de la vibration. Le pignon sur l'axe de cette roue à rochet commande, par l'intermédiaire d'engrenages, les différentes aiguilles. Les

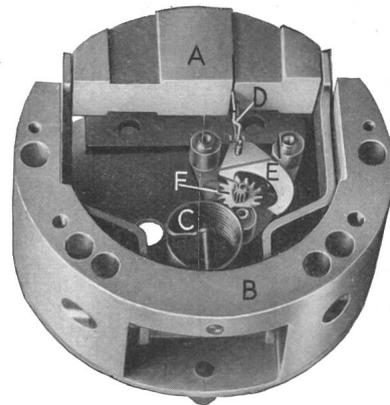


Fig. 5.

Compteur d'oscillations, construction intérieure.

deux extrémités parallèles de la came, orientées dans le plan des vibrations, sont reliées par une partie oblique dont la longueur et l'inclinaison sont déterminées de façon à ce que le compteur réagisse à partir des amplitudes de $\pm 0,7$ mm. Si les amplitudes sont plus grandes⁹⁾, les écarts de la fourchette n'augmentent pas, grâce aux bouts parallèles de la came; si par contre les amplitudes sont plus petites, les écarts de la fourchette ne suffisent plus à faire avancer la roue à rochet. Suivant la forme de la partie oblique de la came on peut varier la sensibilité dans certaines limites. Le mécanisme ressemble à l'échappement d'une montre, mais avec la grande différence que la roue d'échappement subit le couple du ressort et que son mouvement est arrêté périodiquement par l'ancre, tandis que dans le compteur de vibrations c'est précisément la fourchette qui fait avancer la roue F.

Le mouvement est logé dans un boîtier embouti en anticorodal, le verre étant serré entre deux anneaux de caoutchouc, empêchant toute pénétration d'humidité atmosphérique qui pourrait provoquer des corrosions. L'appareil avec la pince de fixation est représenté à la fig. 6. Il ne pèse que 450 g grâce à l'emploi d'alliages légers pour toutes les parties qui ne sont pas soumises à une usure rapide, de sorte que ce poids supplémentaire n'a qu'une influence négligeable sur la vibration des câbles. Mais

⁹⁾ A partir d'un certain écart, les amplitudes du pendule sont limitées par des butées en caoutchouc.

l'appareil serait probablement trop lourd pour étudier par exemple les vibrations de fils téléphoniques.

Le cadran, orienté vers le sol, a un diamètre de 60 mm, de sorte qu'on peut faire les lectures pen-

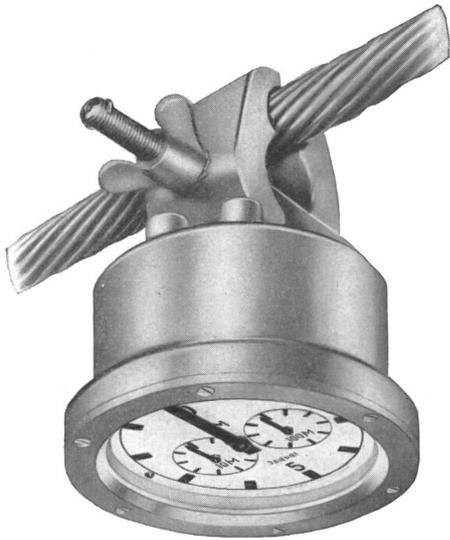


Fig. 6.

Compteur d'oscillations fixé à un conducteur de ligne.

dant le service, éventuellement à l'aide de jumelles. Une révolution de la grande aiguille correspond à

1 million de vibrations, une révolution des petites à 10 resp. 100 millions. La pratique a démontré que cette graduation est la plus opportune. On a renoncé à une remise à zéro parce qu'elle n'est pas nécessaire et ne pourrait causer que des erreurs, même dans une construction très soignée.

Des essais, effectués sur une machine vibrante à fréquence connue dans l'intervalle de 4 à 100 par seconde ont démontré que ce compteur enregistre le nombre exacte. La limite supérieure ne dépend que de la résistance du matériel et de son usure. C'est pour cette raison que toutes les pièces importantes, telles que came, fourchette, roue à rochet, etc. sont en acier trempé. Les essais pratiques ne durent pas encore assez longtemps pour pouvoir indiquer des chiffres concernant la longévité de ces compteurs, mais l'on peut prétendre déjà maintenant qu'à ce sujet ils sont bien supérieurs aux recorders.

A l'aide de ces instruments il est facile de constater si les vibrations constituent un réel danger pour le câble et si l'amortisseur fixé a amené le succès espéré. L'expérience nous apprendra si l'on peut obtenir certaines normes pour l'amplitude minimum admissible et le nombre de vibrations pendant une durée d'observation déterminée, en tenant compte des conditions climatiques et de la saison.

Ueber einige Integralreliefs für die nomographische, bzw. nomographisch-graphische Berechnung der Freileitungen vom Standpunkt der Festigkeit aus.¹⁾

Von Alexander Fischer, Prag.

518.3 : 621.315.056.1

Als Ergänzung zu der im Bull. SEV 1936, Nr. 7, erschienenen gleichbenannten Arbeit wird ein viertes Integralrelief hergeleitet und schematisch entworfen, das die Ermittlung von Durchhang und Beanspruchung auf reinnomographische Weise, d. h. ohne irgendwelche Nebenrechnungen ermöglicht.

Comme supplément à l'étude parue sous le même titre dans le Bull. ASE 1936, No. 7, l'auteur déduit et esquisse un quatrième relief d'intégrale qui permet de déterminer la flèche et la tension d'une manière purement nomographique, c'est-à-dire, sans aucun calcul accessoire.

In der vor einem Jahre unter dieser Ueberschrift erschienenen Arbeit²⁾ habe ich drei Integralreliefs hergeleitet und schematisch entworfen, die die nomographisch-graphische Berechnung des «verhältnismässigen Durchhanges φ » einer Leitung mit gleichhohen Befestigungspunkten ermöglichen sollen. Ich habe hierbei eine «méthode mixte» angewendet, d. h. die Durchführung der wesentlichen Berechnungen den Nomogrammen zugewiesen, während ich für Nebenrechnungen die Benützung des Rechenschiebers empfohlen habe. Ist dieser Vorgang zwar in praktischer Hinsicht durchaus zulässig, da die angeführten Verfahren wohl am einfachsten und genauesten zum Ziele führen, so dürfte dennoch die Frage nach der in nomographischer Hinsicht besten, d. h. mit einem Mindestmass von nicht nomographischen Rechenschritten auskommenden Lösung, nicht ohne Reiz sein, die in der bereits genannten, während der Drucklegung erschienenen Arbeit von V. Hruska-V. Kelbich in den Vordergrund gestellt worden ist. Ich möchte nun

in Kürze zeigen, dass es in der Tat möglich ist, unter Heranziehung der beiden bereits verwendeten Prinzipien, d. i. desjenigen der «Fluchtlinien» und desjenigen der «Doppelknotenpunkte» sowie der Benutzung eines weiteren, anscheinend neuen Gedankens bei der Vertafelung simultaner Funktionsbeziehungen, ein viertes Integralrelief herzuleiten, das ohne irgendwelche Nebenrechnung — und möglicherweise mit einem Mindestmass von «Fluchten» («Ablesegeraden») — nicht nur den verhältnismässigen, sondern gleich den tatsächlichen Durchhang und die Beanspruchung gleichzeitig und auf einfachste Weise ergibt.

1. Herleitung des Integralreliefs.

Die Berechnung von Durchhang und Spannung beruht auf folgendem System simultaner Funktionsbeziehungen:

$$t_i = \frac{16}{6} \frac{10^4}{\alpha} \varphi_i^2 - \frac{1,25}{E \alpha} \frac{\gamma_i}{\varphi_i} + c, \quad (I)$$

$$\varphi_i = \frac{f_i}{a}, \quad (II)$$

¹⁾ Bei der Redaktion eingelangt am 14. April 1936.

²⁾ Bull. SEV 1936, Nr. 7.