**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens
**Band:** 59 (1968)
**Heft:** 16

**Artikel:** Les longueurs partielles des portées pour les conducteurs en faisceaux
**Autor:** Möcks, L.
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-1057417

**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:** 22.08.2025

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

# Les longueurs partielles des portées pour les conducteurs en faisceaux

Par *L. Möcks*, Schwabach

621.315.145

*Les conducteurs partiels d'un câble de groupe de lignes doivent être mutuellement écartés à des intervalles déterminés. Pour cette longueur partielle de champ on a assemblé les valeurs expérimentales résultant de la pratique et des essais. Des essais sur maquette démontrent une stabilité accrue des groupes pour des longueurs partielles de champ plus restreintes. On déduit enfin un procédé d'approximation pour le calcul des longueurs partielles de champ dont les résultats fournissent une bonne concordance entre les valeurs de la pratique et de la théorie.*

*Die Teilleiter einer Bündelleitung müssen in bestimmten Abständen distanziert werden. Für die sog. Teilfeldlänge werden Erfahrungswerte aus Praxis und Versuch zusammengetragen. Modellversuche zeigen eine zunehmende Bündelstabilität mit kleiner werdender Teilfeldlänge. Schliesslich wird ein Näherungsverfahren zur Berechnung der Teilfeldlänge abgeleitet und gute Übereinstimmung zwischen Praxis und Theorie gefunden.*

*(Traduction)*

## 1. Généralités

Les conducteurs composants d'un faisceau sont maintenus écartés dans chaque portée par des entretoises. Il n'existe pas de règle fixe pour la distance entre les diverses entretoises, distance que nous appellerons longueur partielle de la portée. Dans le réseau allemand à 220 et à 380 kV cette distance est habituellement de 40 à 50 m. A l'étranger, et particulièrement aux USA, les entretoises sont montées à des distances de 70 à 80 m. Des expériences dans ce domaine ont malheureusement été rarement publiées. La pratique ne donne que des indices pour la détermination d'une distance optima.

La distance entre les entretoises a une importance considérable au point de vue financier, à côté de sa signification purement technique. Si par exemple l'écartement est fixé à 40 m au lieu de 80, le nombre de ces entretoises sera doublé. Il est facile de se représenter les répercussions d'une telle décision sur les frais d'établissement et d'entretien.

Le but de la présente étude est d'une part, la description des quelques rares résultats d'expériences pratiques et d'autre part l'établissement d'une règle théorique pour la distance entre les entretoises.

## 2. Validité des recherches

Les études se rapportent en pratique et en théorie au faisceau horizontal de deux conducteurs. Ce genre de faisceau est très répandu et a presque complètement supplanté le faisceau vertical expérimenté tout d'abord. Les conclusions des recherches s'appliquent par analogie aussi aux faisceaux de trois et quatre conducteurs, pour autant qu'au moins deux conducteurs se trouvent dans un plan horizontal.

L'étude ne prend pas en considération la résistance mécanique et électrique des entretoises. On admet implicitement que ces éléments de construction sont capables de résister aux sollicitations qu'ils doivent supporter.

## 3. Motifs de distancer les conducteurs

Si un faisceau horizontal de deux conducteurs est posé sans entretoises sur une portée de 300 à 400 m, les conducteurs composants se toucheront sous l'effet du vent et du courant. Avec du vent soufflant en rafales, il se produira ce qu'on appelle des oscillations pendulaires. Si les oscillations ont des mouvements de sens contraires, les conducteurs du faisceau se frappent avec violence. Il en résulte une déformation visible de la surface de la corde.

La fig. 1 montre les conducteurs composants d'un faisceau de trois conducteurs après qu'ils se sont frappés l'un contre l'autre par l'effet des forces électrodynamiques. La couche des fils extérieurs de tous les conducteurs s'est visiblement desserrée. Il est douteux qu'un conducteur ainsi endommagé puisse rester longtemps apte au service. La résistance à la corrosion diminue, tandis que l'intensité du champ électrique superficiel augmente, ce qui favorise la formation des effluves. La force du vent produit des oscillations de nature semblable, de sorte qu'il faut compter avec les mêmes dégâts que ceux provoqués par les forces électrodynamiques.

Si les conducteurs du faisceau sont soumis à une forte charge thermique pendant leur choc provoqué par le vent, les forces électrodynamiques peuvent causer un collage de ces conducteurs. Un processus de frottement lui est inévitablement lié, ce qui endommage aussi les cordes.

Abstraction faite des considérations purement mécaniques, l'écartement des conducteurs constituants du faisceau devrait être garanti dans la portée, aussi du point de vue électrique. C'est ainsi seulement qu'on obtient l'avantage d'une faible impédance caractéristique. Un faisceau de deux conducteurs pour une tension de service de 380 kV a par exemple une puissance naturelle de 25 % supérieure à celle d'un conducteur simple.

Le champ superficiel des conducteurs en faisceau a une influence déterminante sur l'absence de perturbations radiophoniques. Quand l'écartement des conducteurs diminue, le champ superficiel augmente. La rigidité diélectrique de la ligne diminue et des perturbations de la télévision et de la radio peuvent se produire.

Pour une ligne aérienne, contrairement aux postes de couplage, il n'y a pas lieu de prendre en considération le comportement dynamique du faisceau en cas de court-circuit, qui est étroitement lié avec la subdivision de la portée. C'est la raison pour laquelle la longueur optima recherchée ici ne tient pas

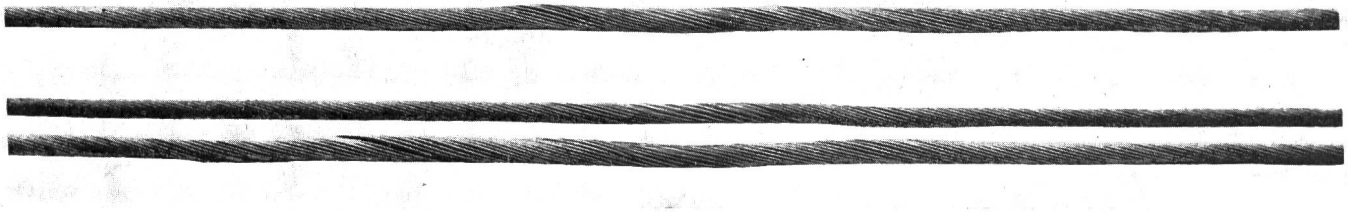

Fig. 1
**Cordes endommagées après que les conducteurs composants se sont heurtés**

compte du courant de court-circuit. Le choc de courte durée des conducteurs composants entre eux en cas de défaut doit expressément être admis. Il est facile de défendre ce point de vue, car le cas de court-circuit est extrêment rare, et il est de durée courte (env. 0,2 s). La durée du défaut joue un rôle important dans la question du choc des conducteurs sous l'effet des forces électrodynamique en cas de court-circuit. Pour des durées courtes et des conducteurs lourds, ils sont soumis à des oscillations, mais sans nécessairement entrer en contact.

### 4. Longueurs partielles de portée dans des stations d'essais et des lignes de transport

Un faisceau horizontal de deux conducteurs a été essayé dans une ligne d'essai de la Ohio-Edison Comp. [1][1]). La corde Al/Acier avait un diamètre d'environ 30 mm et l'écartement des conducteurs du faisceau était de 46 cm. En cas de fort vent les conducteurs composants se heurtaient fréquemment, pour des portées de 250 à 330 m sans entretoises. Il se produisait alors un claquement semblable à celui d'un fouet, perceptible à distance. Après montage des entretoises, les contacts n'ont plus été observés que dans une portée subdivisée en longueurs partielles de 94 m. On a ensuite réduit cette longueur à 76 m et les contacts ont disparu. Le rapport ne contient malheureusement aucune indication concernant la tension des cordes ou l'EDS[2]).

*F. Cahen* et *F. Pelissier* [2] rapportent au sujet des essais d'un faisceau horizontal de deux conducteurs dans une installation à 500 kV. Pour une portée de 500 m et un écartement de 40 cm des conducteurs composants, les conducteurs sans entretoises se heurtaient déjà pour une vitesse du vent de 15 m/s. Pour une portée de 250 m, le contact ne se produisait que pour 25 m/s. Après un seul choc, les conducteurs oscillaient 8 à 20 fois avant de revenir au repos. Deux à trois entretoises par portée ont été recommandées. De plus, on a insisté sur le danger du collage des conducteurs par les forces électrodynamiques.

Le rapport de Hornisgrinde [3] propose, dans le chapitre «danse, soulèvement», de choisir une distance plus petite entre les entretoises et les points de suspension qu'entre les entretoises situées dans la portée. Cela améliore la stabilité du faisceau, et le retour en place du faisceau renversé est facilitée. Une distance de 15 m est recommandée au voisinage des pinces de suspension ou d'amarrage, distance pouvant atteindre au maximum 60 m jusqu'au milieu de la portée.

*Mather* et *Hard* [4], dans leur excellent rapport sur les entretoises, ne touchent que superficiellement le thème «longueurs partielles». En conclusion, ils recommandent de ne pas dépasser une distance de 76 m (250 pieds). Cet écartement doit être plus petit près des pylônes.

*Edwards* et *Boyd* [5] ont fait un rapport sur des essais de conducteurs en faisceau et sur leur comportement dans des conditions limites déterminées. Aucun contact des conducteurs composants n'a été observé, dans des «conditions normales», pour une ligne d'essai à faisceau horizontal de deux conducteurs écartés de 45,4 cm et pour des longueurs partielles de 120 m. Comme corde, on a utilisé la corde Al/Acier «Hawk» avec une traction égale à 12 respectivement 17 % de la charge de rupture.

La ligne suédoise à 380 kV de Harspranget à Hallsberg [6] a pour chaque phase un faisceau horizontal de deux conducteurs composé de la corde Al/Acier «Curlew» (diamètre: 31,7 mm). L'écartement des conducteurs composants est de 45 cm, la traction à 0 °C, sans surcharge, est de 6 kp/mm². La distance entre entretoises a été fixée à 130 m, après de nombreuses expériences faites sur des lignes d'essai. Cette distance correspond aussi à des considérations économiques. Il a été expressément admis que les conducteurs pouvaient se heurter occasionnellement, cela étant calculé statistiquement. Des essais électriques ont montré qu'il y a de fortes pertes par effet de couronne, sitôt que l'écartement des conducteurs du faisceau descend au-dessous de 20 cm par l'effet du vent.

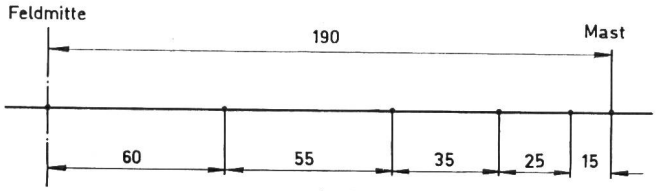


Fig. 2
**Schéma de montage des entretoises**
Dimensions en m
Feldmitte = milieu de la portée; Mast = pylône

La première ligne à 400 kV en Pologne a un faisceau de deux conducteurs écartés de 40 cm [7]. La distance entre les entretoises est d'environ 90 m. La corde Al/Acier a une section de 402,3 mm² d'aluminium et 52,15 mm² d'acier. La plus grande traction produite en cas de surcharge est de 11 kp/mm². La portée normale est de 413 m.

C'est la RWE qui a, en Allemagne, la plus grande expérience des lignes en faisceaux [8]. Pour le faisceau à deux conducteurs, on avait prévu en 1959 des longueurs partielles de 15 à 60 m. Pour la portée de 380 m, on avait prescrit les distances indiquées par la fig. 2, à partir du milieu de la portée. En 1962, les distances ont été corrigées. C'est le schéma de la fig. 3 qui est maintenant valable pour la même portée.

La distance maxima entre les entretoises a été sensiblement réduite. Les raisons de cette modification n'ont pas été publiées. Pour des portées de plus de 480 m on a admis occasionnellement des longueurs partielles maxima de 45 m.

Ces données sont valables aussi bien pour le faisceau horizontal que pour le faisceau vertical de deux conducteurs. Aussi pour le faisceau de quatre conducteurs, pour lesquels on préfère la disposition étagée des entretoises, des distances de 45 m n'ont jamais été dépassées. Pour autant que cela soit connu, une longueur partielle de 60 m n'a jamais été dépassée par d'autres entreprises électriques allemandes.

La première ligne à 400 kV nouvellement installée au Mexique [9] comporte un faisceau horizontal de deux conducteurs Al/Acier de 32 mm de diamètre. L'écartement des conducteurs composants est de 45 cm; la distance entre les entretoises est au maximum de 70 m.

Cette évaluation de la bibliographie et de la pratique ne prétend pas être complète. On peut cependant, en résumé, en tirer les points de vue suivants:

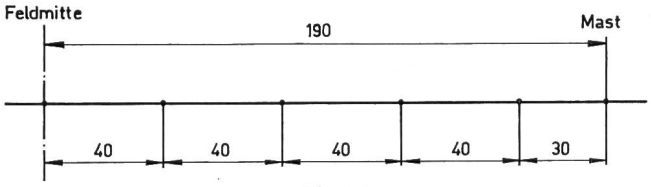


Fig. 3
**Schéma de montage des entretoises**
Dimensions en m
Feldmitte = milieu de la portée; Mast = pylône

[1]) Voir Bibliographie à la fin de l'article.
[2]) Every day stress.

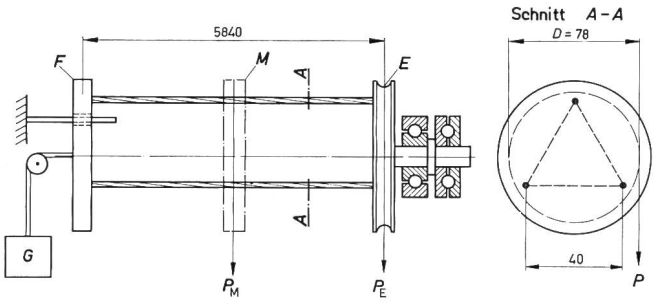


Fig. 4
**Modèle de conducteur en faisceau**
Dimensions en m
*E* poulie de mesure du couple (extrémité de la portée); *F* poulie tendeuse (assurée contre la rotation); *G* poids tendeur; *M* poulie de mesure du couple (milieu de la portée); *P* force de rotation; $P_E$ force de rotation en *E*; $P_M$ force de rotation en *M*
Schnitt *A–A* = coupe *A – A*

a) Dans les lignes allemandes en faisceaux, la longueur partielle de 45 m domine; des longueur de 60 m sont rares.

b) Dans d'autres pays, principalement aux USA, les longueurs partielles vont jusqu'à 76 m au maximum, si on veut éviter avec quelque sécurité que les conducteurs composants se heurtent.

c) La réduction des longueurs partielles près des pylônes semble être appliquée partout.

## 5. Effet de la longueur partielle sur la stabilité des conducteurs en faisceaux

La stabilité du faisceau est la résistance opposée par un conducteur en faisceau à la rotation et à l'entortillement. Sous l'effet de forces extérieures, telles que le vent et la tempête, souvent combinées avec la danse des conducteurs, les conducteurs composants peuvent s'entortiller ensemble [10]. La possibilité d'un endommagement réciproque des conducteurs est grande dans ces conditions. La situation devient critique si les conducteurs se maintiennent dans cette position anormale et ne se détordent pas par leur propre force.

Un modèle a été construit pour une étude qualitative de la stabilité du faisceau en fonction de la longueur partielle de portée. La fig. 4 est une représentation schématique du modèle.

Les essais ont été faits avec un faisceau de trois conducteurs. Les conducteurs composants sont disposés aux sommets d'un triangle équilatéral. L'écartement des conducteurs est de 4 cm et la longueur du modèle de 584 cm. On a utilisé comme conducteurs composants des cordes de cuivre très flexibles de 10 mm² de section. La raideur des conducteurs était faible. A l'extrémité gauche, l'amarrage du faisceau ne pouvait pas tourner, mais était disposé de façon à pouvoir se déplacer dans le sens de l'axe des cordes. C'est là que s'applique, avec un faible frottement et par l'intermédiaire d'un galet, l'effort de traction *G* du faisceau. A l'extrémité droite, le faisceau est amarré en un point fixe, mais pouvant à volonté tourner ou rester fixe; on a utilisé des entretoises rigides en forme de cadre selon fig. 5. Le couple de rotation ou de torsion était introduit, respectivement mesuré par la poulie circulaire selon fig. 4.

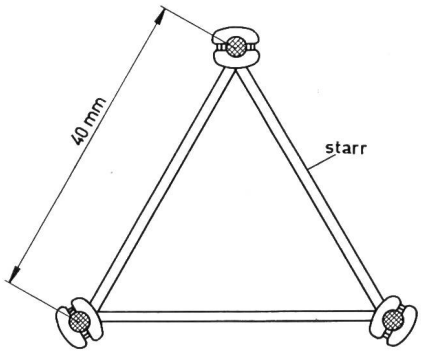


Fig. 5
**Modèle d'entretoises pour faisceau de trois conducteurs**
starr = rigide

La première série d'essais s'est occupée du nombre d'entretoises par portée. Pendant les essais, le couple dans la portée était mesuré à la poulie M. Les deux amarrages terminaux E et F étaient maintenus de façon à ne pas pouvoir tourner.

La fig. 6 indique le rapport entre le couple, la traction et le nombre d'entretoises. On voit que le couple de serrage aussi bien que le couple de desserrage augmentent à peu près linéairement avec la traction. De plus, les deux couples augmentent avec le nombre d'entretoises.

Dans la seconde série d'essais, on a étudié le comportement du couple de serrage pendant une rotation complète (360⁰). La fixation du modèle était rigide à une extrémité et le couple était appliqué à l'autre extrémité (fig. 4). Le résultat de cet essai est représenté à la fig. 7. Indépendamment du nombre d'entretoises chaque courbe passe par un maximum, situé environ vers un demi-tour (180⁰). La valeur absolue du sommet de la courbe augmente nettement avec le nombre d'entretoises.

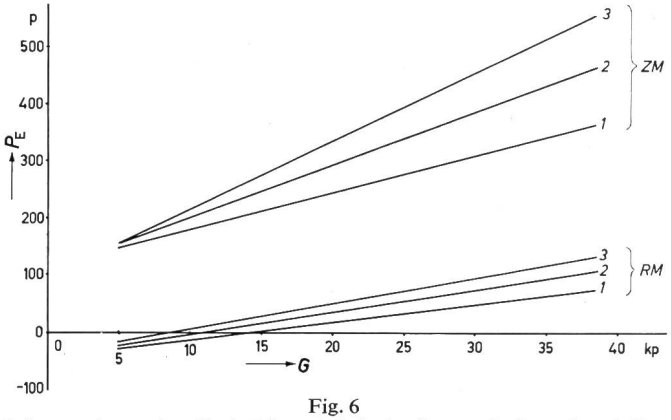


Fig. 6
**Influence du nombre d'entretoises et de la traction sur la force de rotation**
*G* traction; $P_E$ force de rotation; *ZM* couple de torsion; *RM* couple de détorsion; *1, 2, 3* nombre d'entretoises

Une comparaison directe des valeurs absolues des deux, séries d'essais n'est pas indiquée. Comme on l'a mentionné, dans les deux essais les couples n'ont pas été appliqués au même endroit, de sorte que, d'un point de vue absolu, les résultats doivent être différents. Cependant, les résultats indiquent une tendance dans le même sens.

Selon les essais qui précèdent, la stabilité d'un faisceau de conducteurs est une fonction de la traction dans le faisceau et du nombre d'entretoises. La stabilité du faisceau augmente avec la traction comme aussi avec le nombre d'entretoises.

Les essais du modèle ayant été effectués d'un point de vue purement qualitatif, ils sont aussi valables pour d'autres sortes de faisceaux.

## 6. Les longueurs partielles de portées considérées d'un point de vue théorique

Les essais et la pratique ont montré que des conducteurs composants sans entretoises se heurtent facilement et souvent sous l'effet du vent. L'entretoise, considérée sous cet angle, doit en premier lieu être capable d'absorber les forces résultant du vent et d'empêcher le contact mécanique. Contrairement à un poste de couplage, on peut limiter, dans les lignes

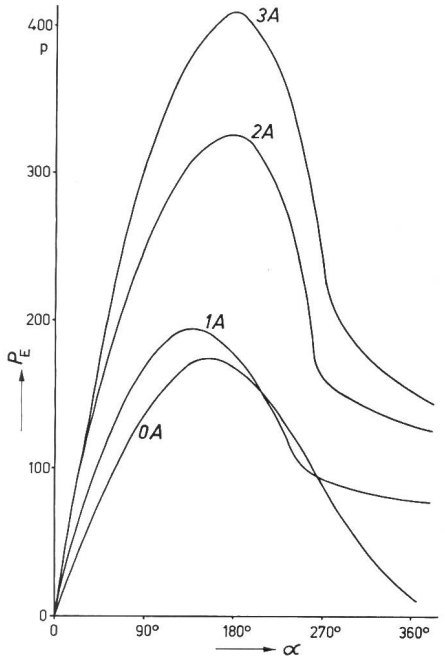


Fig. 7
**Rapport entre la force de torsion $P_E$ et l'angle de rotation α pour un nombre croissant d'entretoises**
Le couple de torsion a été mesuré
*A* entretoises
Traction $G = 35$ kp

aériennes, le domaine d'action des entretoises sur la longueur partielle de la portée à ce seul point de vue. Des oscillations de courte ou de grande longueur d'onde, c'est-à-dire des vibrations ou la danse, sollicitent probablement davantage les entretoises que les oscillations pendulaires déclenchées par le vent. Mais il s'agit ici, comme on l'a déjà signalé, non pas de la sollicitation admissible des entretoises, mais de la longueur partielle de la portée, sur laquelle aussi bien les vibrations que la danse n'ont qu'une influence de second ordre.

Si un faisceau horizontal de deux conducteurs est frappé d'un côté, dans son plan, par un courant d'air de grandeur constante, le faisceau sera dévié jusqu'à la position où l'équilibre s'établit entre la poussée du vent et la force de rappel. Cette poussée du vent n'est que très rarement répartie uniformément sur toute la portée. Les divers tronçons de la portée auront donc des déviations différentes. La situation est particulièrement nette quand une seule longueur partielle de la portée est frappée par le vent. Ce cas limite sera utilisé pour établir les relations théoriques. Cette simplification ne diminue pas la validité générale de la solution.

A côté de la force de rappel résultant du poids, il y a encore une force élastique ou de torsion du conducteur composant tordu, qui tend à le ramener à sa position initiale (fig. 8c).

Si la poussée du vent tombe brusquement à zéro, le conducteur composant entre en une vibration pendulaire libre dont l'amplitude décroît rapidement ou lentement selon le taux d'amortissement. Si des rafales se produisant périodiquement sont superposées au vent, il se produit des oscillations pendulaires libres et forcées. Il y a sur ce sujet des travaux du Comité d'études n° 6 de la CIGRE, qui ne sont pas encore publiés. Les résultats montrent que des rafales sont toujours superposées au vent, avec une régularité plus ou moins grande.

Si des oscillations par choc ou des oscillations forcées se produisent, il faut compter avec une amplitude relativement grande du mouvement pendulaire. Les conducteurs composants sont placés l'un derrière l'autre dans le courant d'air et le vent les rencontre donc à des instants différents. De plus, il y a une influence réciproque d'origine aérodynamique. Une oscillation pendulaire d'une phase différente pour les deux conducteurs est donc possible et facile à expliquer physiquement. On arrive ainsi aux oscillations pendulaires à mouvement contraire des conducteurs composants, telles qu'on les a souvent observées en pratique.

Pour établir la théorie, on considère dans la fig. 8 le tronçon A—B de la ligne en faisceau soumise à la poussée du vent, et on l'étudie (fig. 9).

Le conducteur composant soumis à une oscillation pendulaire selon la fig. 9c peut être considéré comme un pendule physique. Il est soumis à l'équation du mouvement [11]:

$$\mathrm{d}m\, y\, \alpha'' + \mathrm{d}m \cdot g \quad \sin\alpha = 0 \qquad (1)$$

dans laquelle

$\mathrm{d}m$ élément de masse du conducteur (kg);
$y$ flèche de la longueur partielle en un point quelconque $\chi$ (cm);
$\alpha$ angle d'oscillation du mouvement pendulaire;
$g$ accélération de la pesanteur $= 9{,}81$ cms$^{-2}$.

En faisant la somme des deux membres et multipliant par $y$, on obtient l'équation suivante:

$$\sum \mathrm{d}m \cdot y^2 \alpha'' + \sum \mathrm{d}m \cdot g\, y \quad \sin\alpha = 0 \qquad (2)$$

Dans cette équation on a:

$$\sum \mathrm{d}m \cdot y^2 = I \qquad (3)$$

où

$I$ moment d'inertie de la masse de la corde tendue (kp cm s$^{-2}$) rapporté à l'axe de rotation

et

$$\sum \mathrm{d}m \cdot g\, y = M \qquad (4)$$

où

$M$ couple statique de la corde tendue, rapporté à l'axe de rotation (kp cm), pour lequel on peut écrire aussi:

$$M = m g f_s = G f_s \qquad (5)$$

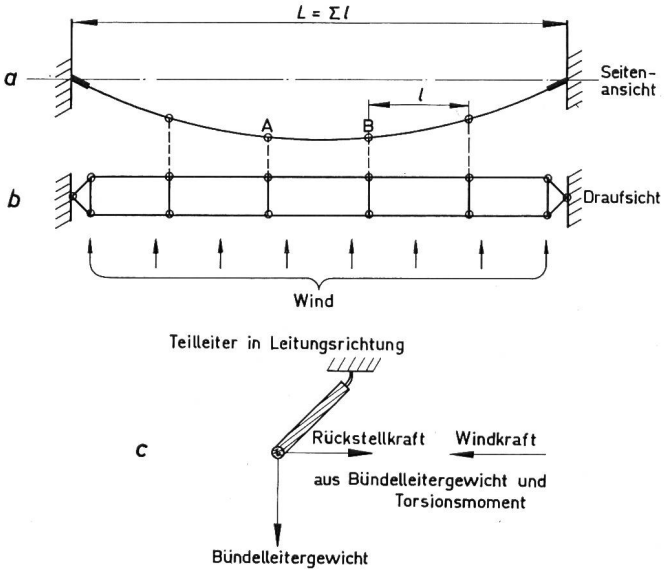


Fig. 8
**Forces sur un conducteur en faisceau**
*a* portée (vue de côté); *b* portée (vue de dessus); *c* forces sur un conducteur composant; *L* portée; *l* longueur partielle
Seitenansicht = vue de côté; Draufsicht = vue de dessus; Wind = vent; Teilleiter in Leitungsrichtung = conducteur composant dans le sens de la ligne; Rückstellkraft = force de rappel; Windkraft = poussée du vent; aus Bündelleitergewicht und Torsionsmoment = composée du poids du conducteur et du couple de torsion; Bündelleitergewicht = poids du conducteur du faisceau

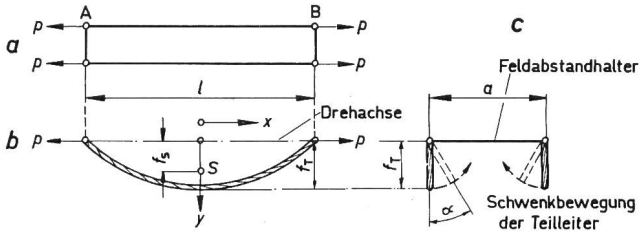


Fig. 9
**Tronçon A – B du faisceau**
*a* longueur partielle (vue de dessus); *b* longueur partielle (vue de devant); *c* longueur partielle (vue de côté)
*l* grandeur de la longueur partielle; $f_T$ flèche de la longueur partielle; $f_S$ distance du centre de gravité à l'axe de rotation; *S* centre de gravité de l'arc de corde; *a* écartement des conducteurs composants; *p* traction; *x* et *y* coordonnées; $\alpha$ angle de rotation
Drehachse = axe de rotation; Feldabstandhalter = entretoise; Schwenkbewegung der Teilleiter = mouvement oscillant des conducteurs composants

où

$f_s$ distance du centre de gravité à l'axe de rotation (cm);
$G$ poids de la corde de la longueur partielle $l$ (kp).

Pour déterminer le moment d'inertie $I$ de la masse, il faut intégrer l'équation (3). Dans le cas du conducteur composant à faible flèche on a approximativement:

$$dm = \frac{q}{g}\,dx \tag{6}$$

et

$$y = \frac{4 f_T}{l^2}\left(\frac{l^2}{4} - x^2\right) \tag{7}$$

où

$q$ poids de la corde (kp cm$^{-1}$)
$f_T$ flèche maximum de la longueur partielle (cm)
$l$ longueur partielle (cm)

L'intégration de l'équation (3) donne, en tenant compte des limites fixées:

$$I = \frac{8}{15}\cdot\frac{q}{g}\,l f_T^2 \tag{8}$$

Pour le couple statique on obtient, d'une manière semblable, avec les équations (4), (6) et (7):

$$M = \frac{2}{3}\,q\,l f_T = f_s\,q\,l \tag{9}$$

Puisqu'il s'agit de considérer l'oscillation pendulaire d'un point de vue purement qualitatif, on peut remplacer sin $\alpha$ par $\alpha$ dans l'équation (2). Si on veut être exact cette approximation n'est valable que pour de petites oscillations. On obtient finalement pour la durée d'oscillation $T_p$:

$$T_p = 2\pi\sqrt{\frac{I}{M}} \tag{10}$$

où

$T_p$ durée d'oscillation du pendule physique (s)

Si on introduit, dans l'équation (10) les équations (8) et (9) pour $I$ et $M$, on trouve:

$$T_p = 2\pi\sqrt{\frac{4}{5}\cdot\frac{f_T}{g}} \tag{11}$$

L'équation (11) est liée à la durée d'oscillation $T_m$ et la longueur $f_m$ du pendule mathématique:

$$T_m = 2\pi\sqrt{\frac{f_m}{g}} \tag{12}$$

par la relation:

$$f_m = \frac{4}{5} f_T \tag{13}$$

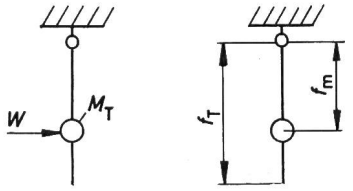


Fig. 10
**Schéma équivalent pour un conducteur composant qui oscille**
$f_T$ flèche de la longueur partielle; $f_m$ longueur du pendule; $M_T$ masse du pendule; $W$ poussée du vent

Dans les études antérieures on a utilisé l'équation du mouvement du pendule mathématique pour déterminer la durée d'oscillation d'une corde. On avait alors posé $f_m = 2/3\,f_T$. Par rapport à l'équation exacte (13), il en résulte une erreur de 8,7 % sur la durée d'oscillation.

Pour les études subséquentes, l'équation du mouvement du pendule mathématique a été utilisée en tenant compte du facteur de correction d'après l'équation (13).

Si le pendule constitué par un conducteur composant est soumis à une poussée constante du vent $W$ (fig. 10), et en supposant qu'il ne s'agit que de petites déviations, l'équation du mouvement est la suivante:

$$m f_m \alpha'' + m g \alpha = W \tag{14}$$

On résoud l'équation (14) en posant le terme perturbateur égal à zéro. On obtient une équation différentielle homogène avec la solution:

$$\alpha_I = C_1 \sin \omega_E \cdot t + C_2 \cos \omega_E \cdot t \tag{15}$$

avec

$$\omega_E = \sqrt{\frac{g}{f_m}} \tag{16}$$

Dans laquelle

$\omega$ pulsation propre du pendule (s$^{-1}$)

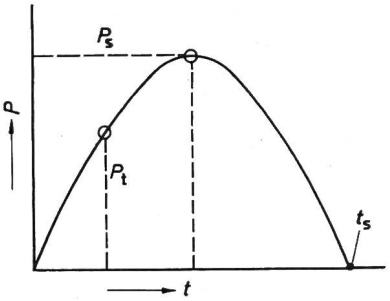


Fig. 11
**Impulsion par choc**
*P* force de choc; *t* durée du choc; $P_s$ amplitude de la force de choc; $P_t$ grandeur de la force de choc en fonction du temps; $t_s$ durée du choc

L'intégrale partielle vaut:

$$\alpha_{II} = \frac{W}{G} \tag{17}$$

La solution complète s'écrit alors:

$$\alpha = \alpha_I + \alpha_{II} = C_1 \sin \omega_E \cdot t + C_2 \cos \omega_E \cdot t + \frac{W}{G} \tag{18}$$

Avec les conditions initiales:

a) pour $t = 0$ on a $\alpha = 0$ (déviation)
b) pour $t = 0$ on a $\alpha' = 0$ (vitesse)

on obtient finalement:

$$\alpha = \frac{W}{G}(1 - \cos \omega_E \cdot t) \tag{19}$$

L'expression $W/G$ définit la nouvelle position moyenne d'oscillation du pendule, autour de laquelle il oscille harmoniquement avec l'amplitude angulaire:

$$\alpha = \frac{W}{G} \tag{20}$$

Si le pendule est excité par un coup de vent (rafale), il se met aussi à osciller. Un tel coup de vent peut être, par exemple, représenté comme une impulsion par choc en forme de demi-sinusoïde (fig. 11).

L'équation du mouvement du pendule oscillant est de la forme suivante:

$$\alpha'' + \frac{g}{f_m}\sin\alpha = W = P_S \sin \omega_S \cdot t \tag{21}$$

$\omega_s$ est la pulsation d'excitation, qui s'obtient en supposant que l'on continue la demi-sinusoïde.

$$\omega_S = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2\,t_S} = \frac{\pi}{t_S} \tag{22}$$

L'équation (21) ne peut pas être résolue dans la représentation exacte. Si on admet de nouveau de petites déviations, la solution avec $\sin \alpha = \alpha$ sera:

$$\alpha = \frac{P_S}{\omega_E^2 - \omega_S^2} \sin \omega_S \cdot t \tag{23}$$

avec

$$\omega_E = \sqrt{\frac{g}{f_m}} \tag{16}$$

Dans le cas de résonance où $\omega_E = \omega_S$ les oscillations du pendule deviennent infinies. Cela n'est valable que pour le cas sans amortissement, qui avait été admis pour simplifier le problème. En pratique, les oscillations seront limitées à des valeurs finies par l'amortissement propre dans la corde et dans l'air.

Une détermination directe de $\alpha$ n'est pas possible pour plusieurs raisons. Les forces du vent ne sont pas constantes dans le temps et leur amplitude est variable. A cela s'ajoutent des relations aérodynamiques entre les deux conducteurs composants, très difficiles à soumettre au calcul. Mais par les vents et les tempêtes, l'énorme densité et la répartition des rafales rendent toujours possible le cas d'excitation ou de résonance. On doit donc compter en permanence avec des oscillations pendulaires.

Si, en se basant sur les expériences pratiques, on suppose que les conducteurs composants oscillent l'un contre l'autre, la flèche de la longueur partielle ne doit pas dépasser une certaine valeur en fonction de l'angle d'oscillation, pour que ces conducteurs ne se touchent pas. En considérant la fig. 9 on obtient la relation suivante, pour le conducteur composant dévié, entre l'écartement $a$ des conducteurs et la flèche $f_T$ de la longueur partielle:

$$a = 2 f_T \sin \alpha \tag{24}$$

Si, en considérant que:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{W}{G} \tag{25}$$

et

$$f_T = \frac{q\, l^2}{8\, H} \tag{26}$$

où

$H$ est la traction dans la corde (kp)

on remplace le sin par la tg, on obtient pour la longueur partielle en partant des équations (24) et (26)

$$l \leqq 2 \sqrt{a \frac{p}{\delta}} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}{\operatorname{tg} \alpha}} \tag{27}$$

où

$\delta$ est le poids spécifique de la corde (kp cm$^{-3}$)

Si les caractéristiques de la ligne sont constantes, la longueur partielle $l$ ne dépend que de l'angle d'oscillation $\alpha$. L'équation (27) donne, pour un angle d'oscillation déterminé $\alpha$, la longueur partielle $l$ pour laquelle les sommets des conducteurs tendus arrivent juste à se toucher. Les dimensions finies du conducteur perpendiculairement à l'axe de la corde (diamètre de la corde) ne sont pas prises en considération. Les cordes sont admises comme étant des lignes.

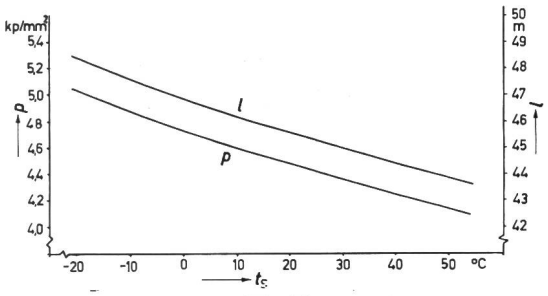


Fig. 12

**Traction de la corde $p$ et longueur partielle $l$ comme fonction de la température $t_S$ de la corde d'une ligne en faisceau à 220 et 380 kV**

Corde: Al/Acier 240/40; traction de la corde $P_{max}$ = 8,25 kp/mm² à —5 °C

Si la poussée du vent est sensiblement plus grande que le poids propre du conducteur, l'angle de déviation $\alpha = 90^0$ sera facilement dépassé. Dans ce cas, on a:

$$l \leqq 2 \sqrt{a \frac{p}{\delta}} \tag{28}$$

Le second terme de l'équation (27) peut donc être considéré comme un facteur de correction pour un angle d'oscillation $<90^0$.

L'équation (28) donne une plus grande sécurité que l'équation (27) contre le contact des conducteurs composants dans le cas d'oscillations pendulaires de sens contraire. Cela doit être pris en considération en tant qu'on a pu prouver que les angles d'oscillation qui se produisent sont plus petits que $90^0$. On obtient alors une plus grande longueur partielle $l$ et ainsi un nombre d'entretoises plus petit.

Selon l'équation (27), la longueur partielle $l$ dépend, non seulement de l'angle d'oscillation $\alpha$, mais encore de l'écartement $a$ des conducteurs composants et de la traction $p$ de la corde. Des conducteurs de poids spécifique élevé avec une forte traction permettent, pour une même poussée du vent, une longueur partielle plus grande que des cordes légères ayant une traction plus faible. L'équation (28) ne convient pas pour cette discussion. La simplification effectuée par rapport à l'équation (27) donne l'image fausse d'une longueur partielle qui diminue quand le poids spécifique des conducteurs augmente.

On devrait, pour être correct, introduire comme traction $p$ de la corde la valeur augmentée par la poussée du vent. Pour ne pas faire perdre à l'équation (28) son caractère de solution approchée, on renoncera ici au calcul un peu laborieux de la tension de la corde produite par le vent. On peut prouver que la différence entre la traction normale et celle influencée par le vent est faible.

## 7. Discussion de l'équation des longueurs partielles à l'aide d'exemples

Une corde Al/Acier de 240/40 mm² a, pour une portée de 350 m et une traction aux extrémités de 8,25 kp/mm² une traction au milieu de la portée de 4,56 kp/mm² (à $+10^0$). Dans un faisceau horizontal de deux conducteurs avec 40 cm d'écartement des conducteurs composants, ainsi tendu, l'équation (28) donne, pour la longueur partielle:

$$l \leqq 2 \sqrt{40 \frac{456}{3{,}45 \cdot 10^{-3}}} \leqq 46 \text{ m}$$

Cette valeur correspond bien à la longueur partielle de 45 m admise dans le réseau allemand à 380 kV.

Il est intéressant aussi d'étudier la variation de la longueur partielle selon la traction.

La portée normale du réseau allemand à 380 kV est de 350 m [12]. Avec une traction de $p$ = 8,25 kp/mm² aux extrémités (75 % de 11 kp/mm²) on obtient la courbe de la fig. 12, en fonction de la température $t_S$ de la corde. Le changement de la longueur partielle $l$ en fonction de la traction $p$ de la corde est peu important, comme on pouvait s'y attendre, puisque $p$ se trouve sous la racine dans l'équation (28). Il semble raisonnable, et admissible au point de vue technique, de se baser sur la traction au milieu de la portée pour fixer la longueur partielle. Même pour les hautes températures de l'été, une forte chute de température se produira en cas de vent ou de tempête. La ten-

sion au milieu de la portée (à $+10^0$) est en chiffres ronds de 4,6 kp/mm² dans le réseau allemand à 380 kV, pour des cordes Al/Acier 240/40 mm², avec une portée de 350 m. Cela représente 16 % de la charge nominale admise auparavant.

Aux USA on calcule pour ce qu'on appelle: «medium area» (zone ayant les conditions ambiantes moyennes pour le givre, le vent, etc.) avec une EDS (à 15,6 °C) de 20 à 25 % de la charge de rupture de la corde [13]. Si on rapporte ces données à la corde canadienne connue «Condor», ayant un diamètre de 27,72 mm, une section = 402/52 mm², une charge de rupture de 12950 kp, on obtient pour la traction $p$ de la corde:

$$p = \frac{0{,}225 \cdot 12950}{454} = 6{,}42 \text{ kp/mm}^2$$

Ici on calcule avec une EDS moyenne de 22,5 %. Si cette corde est posée dans un faisceau horizontal de deux conducteurs avec l'écartement usuel aux USA de 45 cm environ, on obtient pour la longueur partielle:

$$l = 2\sqrt{45 \frac{642}{3{,}31 \cdot 10^{-3}}} = 59 \text{ m}$$

Dans la «Light area» on admet des tractions de travail de 30 à 40 % de la charge de rupture de la corde [13]. Avec 35 %, la traction dans la corde «Condor» sera:

$$p = \frac{0{,}35 \cdot 12950}{454} = 10 \text{ kp/mm}^2$$

Avec cette valeur, la longueur partielle $l$ devient:

$$l = 2\sqrt{45 \frac{1000}{3{,}31 \cdot 10^{-3}}} = 74 \text{ m}$$

Le résultat correspond d'une façon frappante avec la valeur maximum de 250 pieds = 76 m recommandée aux USA comme longueur partielle maximum.

Les exemples montrent tout d'abord un accord utilisable entre la théorie et la pratique. Cela est vrai pour les conditions allemandes aussi bien que pour les américaines. L'équation (28) représente donc un point de repère sûr pour la détermination de la longueur partielle.

On pourrait sûrement, par un choix convenable du rapport $W/G$, obtenir aussi avec les équations (25) et (27) une certaine concordance entre les autres valeurs pratiques et la théorie. Mais une telle preuve renferme trop de spéculation, c'est pourquoi on y renonce. Une chose certaine, c'est que les lignes situées dans une région de collines et en dehors de la direction principale du vent ne posent pas de problème pour les longueurs partielles qui peuvent par ce fait être largement dimensionnées. Les conditions sont toutes différentes pour des lignes en pays plat, près des côtes et celles dont la direction est perpendiculaire aux vents dominants. Là il faut compter avec un violent effet du vent.

L'équation (28) peut aussi expliquer les grandes différences constatées dans des conditions de tracé égales ou semblables. Cela est démontré par la comparaison de lignes allemandes et américaines typiques. Le désaccord apparent observé jusqu'ici dans la longueur partielle doit être attribué, pour la plus grande partie, à des différences dans l'écartement des conducteurs composants et dans leur traction.

Les deux structures de lignes offrent la même sécurité contre le redoutable choc des conducteurs composants entre eux par le vent. Ce résultat n'est pas surprenant après que le problème de la «longueur partielle» a été étudié, en partie pendant des années, aussi bien en Allemagne que dans des stations d'essai américaines.

## 8. Résumé


Les conducteurs composants d'une ligne en faisceau se heurtent dans la portée libre, déjà sous une faible vitesse du vent, s'ils ne sont pas distancés par des entretoises. Le contact mécanique se produit sous forme de choc et provoque des déformations de la corde. Dans des conditions défavorables, les conducteurs composants peuvent se coller par l'effet des forces électrodynamiques et frotter l'un contre l'autre.

L'analyse des résultats d'essais et des expériences de la pratique a montré que pour un faisceau horizontal de deux conducteurs, dans les conditions allemandes, la longueur partielle maximum est de 45 m. Aux USA on recommande au maximum 76 m.

L'étude théorique du faisceau de conducteurs soumis à l'effet du vent a montré une oscillation pendulaire de sens opposé des conducteurs composants. En partant de cette hypothèse, on a trouvé, pour la longueur partielle, une condition simple qui empêche les conducteurs composants de se heurter. D'après cela, la longueur partielle admissible croît avec la racine de l'écartement des conducteurs et de la traction. Une comparaison entre la théorie et la pratique a montré une bonne concordance.

La longueur partielle maxima admissible selon les équations (27) et (28) est valable pour des conducteurs en faisceau soumis à la poussée du vent et oscillant ou ayant un mouvement pendulaire. Un choc des conducteurs composants entre eux est cependant possible dans le cas particulier de la danse des cordes dans la portée entière. Des mouvements se produisent alors, qui n'ont pas été pris en considération lors de l'établissement des équations (27) et (28).

Il est recommandable pour augmenter la stabilité du faisceau, de réduire progressivement la longueur partielle maximum admissible vers les pylônes à environ 50 à 60 % de la valeur initiale du milieu de la portée.


### Bibliographie


[1] *C. R. Bond* and *F. A. Denbrock:* Design and tests of 345 kV transmission lines for the Ohio Edison System. Proc. American Power Conference 22(1960), p. 577...590.

[2] *F. Cahen* et *R. Pelissier:* L'emploi de conducteurs en faisceaux pour l'armement des lignes à très haute tension. Résultats d'essais de la station expérimentale à 500 kV de Chevilly. Bull. soc. franç. électr. 6/8(1948), p. 111...160.

[3] *H. Mors* und *W. Leibfried:* Die Bündelleiterversuchsanlage Hornisgrinde. Karlsruhe, Badenwerk AG, o. J.

[4] *R. J. Mather* and *A. R. Hard:* Horizontal bundle spacers Trans. AIEE, Power Apparatus and Systems 77(1958), p. 823...833.

[5] *A. T. Edwards* and *J. M. Boyd:* Bundle-conductor-spacers design requirement and development of «spacer-vibration damper». Ontario Hydro, research quarterly 16(1964)2, p. 1...12 + 14.

[6] *O. D. Zetterholm:* La ligne de transmission à 380 kV de Harspanget à Hållsberg. Bull. soc. franç. électr. 6/10(1950), p. 268...276.

[7] *K. Pochop:* Die erste 400-kV-Leitung in Polen. Elektrotechniky Obzor 54(1965), p. 490...493, ref. in: Elektrotechnik, Industrie und Betrieb 48(1966), p. 255.

[8] *H. Glöyer* und *T. Vogelsang:* Die 380-kV-Leitung Rommerskirchen-Hoheneck. ETZ-A 79(1958), p. 202...206.

[9] *P. Cathelat:* Das Wasserkraftwerk von El Infiernillo und die 400-kV-Leitung El Infiernillo-Mexiko der Comisión Federal de Electricidad in Mexiko. Techn. Informationsblatt des Franz. Generalkonsulates, Zürich –(1966)7/8, p. 1...7, ref. in: Bull. SEV 58(1967)5, p. 225...226.

[10] *L. Moecks:* Tanzen von Freileitungsseilen. Elektr.-Wirtsch. 65(1966), p. 803...807.

[11] *E. Hübner:* Technische Schwingungslehre in ihren Grundzügen. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer, 1957.

[12] Die Planung des 380-kV-Netzes in der deutschen Verbundgesellschaft. Heidelberg, deutsche Verbundgesellschaft e. V., 1957.

[13] *E. Fritz:* The effect of tighter conducter tensions on transmission line costs. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 79(1960), p. 513...527.



**Adresse de l'auteur:**

*L. Möcks,* Ingénieur, Richard Bergner, Elektro-Armaturen, D–8540 Schwabach.