

Calcul des ponts suspendus à câble et sans hauban

Autor(en): **Paris, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **33 (1907)**

Heft 6

PDF erstellt am: **10.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-26224>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Bulletin technique de la Suisse romande

ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES. — Paraissant deux fois par mois.

Rédacteur en chef: P. MANUEL, ingénieur, professeur à l'Ecole d'Ingénieurs de l'Université de Lausanne.

Secrétaire de la Rédaction: Dr H. DEMIERRE, ingénieur.

SOMMAIRE: *Calcul des ponts suspendus à câble et sans hauban*, par M. A. Paris, ingénieur. — *Les installations électriques pour l'exploitation et l'éclairage dans le grand tunnel du Simplon*, par M. E. RoI. — **Divers:** *Concours*: Concours d'idées pour la construction d'un hôtel aux abords de la gare de Vevey. — Maisons de campagne modernes. — Nouveau système de charpente en bois. — Tunnel du Ricken. — *Sociétés*: Association amicale des anciens élèves de l'école d'ingénieurs de Lausanne: procès-verbal de l'assemblée statutaire du 16 mars 1907. — Offre d'emploi.

Calcul des ponts suspendus à câble et sans hauban.

Par A. PARIS, ingénieur civil,
Privat-docent à l'Université.

Comme l'arc élastique à deux articulations, le pont suspendu n'est qu'une fois statiquement indéterminé. Son calcul se fait généralement par des méthodes analytiques, basées sur l'hypothèse de déformations insignifiantes du câble raidi, supposition qui n'est admissible que pour une poutre raidissante suffisamment forte pour bien répartir les charges, et qui ne permet que son calcul approximatif.

Nous nous proposons de rechercher une méthode tenant compte de la solidarité du câble et de la poutre et permettant de fixer leurs dimensions par un calcul unique. Nous admettrons du reste l'hypothèse des déformations négligeables, comme dans les autres systèmes hyperstatiques.

La différence fondamentale de notre système avec l'arc élastique sans tympans vient de ce que, dans ce dernier, l'arc supporte à lui seul les poussées normales comme les moments fléchissants qu'elles occasionnent. La poutre sous chaussée n'est supposée là que pour transmettre les charges sur les montants verticaux reposant sur l'arc. Sa résistance à la flexion est négligée. Dans le pont suspendu, au contraire, le câble, susceptible de supporter de grands efforts longitudinaux de tension, est incapable de résister à un effort de flexion appréciable. Toute la résistance à la flexion est demandée à la poutre raidissante par le câble déformable. On ne considère dès lors pas les nœuds de la membrure droite comme articulés. On ne peut, au contraire, calculer les déformations élastiques qu'en tenant compte de leur résistance à la flexion, condition de stabilité du système.

Notre épure représente ce système, articulé sur les piles A et B. Le câble est ancré dans le sol à une certaine distance et nous étudierons plus loin l'influence de ces ancrages. Nous admettrons d'abord les attaches A et B fixes. Comme les appuis (A) et (B) de la poutre se trouvent en avant des piles, nous reporterons les articulations en A* et son symétrique B*, ce qui n'a pas d'influence, vu le peu d'élasticité du câble et nous supposons les appuis (A) et (B) remplacés par des suspensions α .

Nous décomposons les réactions obliques R et R' du câble dans leurs éléments verticaux V et V' et horizontaux $\pm H$. La composante H suivant la corde A* B* pourrait être oblique en cas de dissymétrie. Pour la commodité, nous avons fait la décomposition en A, mais nous introduirons dans le calcul les valeurs relatives à A*. Les composantes verticales étant statiquement déterminées, nous recherchons la ligne d'influence de la tension H. Pour cela, nous faisons agir une force $H = 1$ dans la corde A* B* et nous traçons les deux lignes élastiques verticale et horizontale du système d'une manière analogue à celle exposée par le Professeur W. Ritter pour l'arc élastique.

Une section X verticale intéresse un élément s de la poutre et l'élément correspondant t du câble. La poutre et le câble ont des coefficients d'élasticité E et E', qui peuvent être très différents, suivant les matériaux. Nous nommerons I le moment d'inertie de la poutre et F la section utile du câble.

La force H se décompose en deux forces S et T agissant dans les éléments de la construction. La force T du câble est centrée, l'autre composante S, résultat des actions a, b, c, est verticale et passe par l'intersection de T et H. Son moment fléchissant par rapport au centre de l'élément s est donc égal à $H y$, différence des moments de H et T. Ce moment provoque une déformation angulaire du segment de poutre égale à $H g y$, où $g = s : E I$ est le poids élastique de l'élément s. Sous l'influence de cette déformation, le point A* se déplacera et la corde A* B* s'allongera. Mais le câble, ne pouvant se disjoindre dans la coupe X, fera pivoter les barres a, b et c et le déplacement de A* sera

$$H g y \left(a - \frac{c + d}{2} \right) = H g y^2.$$

La déformation longitudinale du câble provoque un second déplacement relatif de A* et B*. La force agissant est $T = H \cdot h : r$, et l'allongement horizontal de la barre t est $[H h t : r E' F] \cos \alpha$, où $\cos \alpha$ est égal à h/r , ce qui donne

$$H h^2 t : E' F r^2,$$

déplacement qui se transmet intégralement en A*.

La déformation des tiges de suspension a une influence négligeable, comme généralement du reste celle du câble lui-même, comme nous le verrons par la suite.

Posons maintenant par analogie avec l'arc à deux articulations

$$w_s = g \cdot y \quad \text{et} \quad w_t = t \cdot h : E' F r^2$$

ou w_t et w_s sont les angles de rotation provoquant les déplacements relatifs de A^* et B^* . Nous considérons ces angles comme poids élastiques relatifs aux divers éléments de poutre et de câble et les faisons agir aux centres de rotation correspondants, soit au milieu des barres du câble le poids w_s relatif au segment de poutre sous jacent et au milieu des segments de poutre celui w_t , qui provient du câble superposé.

Nous avons à rechercher maintenant deux lignes élastiques. Premièrement, nous traçons la ligne élastique $A_1 B_1$ de la poutre, pour déterminer le déplacement vertical du pied des charges mobiles. Pour cela, nous faisons agir verticalement les seuls poids w_s , angles de déformation de la poutre. Nous prenons une distance polaire c_1 et la choisissons égale à la somme $\Sigma (w_s + w_t)$ de tous les poids élastiques. Le déplacement du pied d'une force P sous l'influence de $H = 1^t$ sera donc égal à $c_1 \cdot z$, puisque les angles w_s sont divisés par la distance polaire c_1 .

En second lieu, nous traçons la ligne élastique horizontale du système entier pour calculer l'allongement de la corde $A^* B^*$ sous l'action de $H = 1^t$. Nous faisons donc agir tous les poids, soit w_s et w_t , horizontalement et les coordonnons par un polygone funiculaire de distance polaire c_2 . Nous obtenons ainsi sur la corde $A^* B^*$ un segment 2. $c_2 \cdot e = m \Sigma (w)$, où m est l'ordonnée du centre S des poids élastiques sous $A^* B^*$. Il résulte du théorème de la réciprocité, qui veut que l'allongement de $A^* B^*$, sous l'influence d'une force P unitaire, soit égal au déplacement vertical de P sous l'influence de la force H suivant $A^* B^*$, l'équation

$$P \cdot c_1 \cdot z = H \cdot m \cdot \Sigma (w)$$

soit, puisque $c_1 = \Sigma (w)$

$$H = P \cdot \frac{z}{m}$$

Comme dans l'arc, le polygone $A_1 B_1$ est la ligne d'influence de la tension H , mais avec cette différence que si les poids w_t du câble ne sont pas négligeables, la distance polaire c_1 est plus grande que la somme $\Sigma (w_s)$ des poids élastiques de la poutre. Il en résulte une diminution de la tension en cas de faible coefficient d'élasticité du câble.

Le point F d'intersection de la réaction totale R avec la ligne m se détermine, par raison d'équilibre, les composantes étant $P \cdot \frac{z}{m}$ et $P \cdot \frac{i}{l}$, en prolongeant dans le polygone $A_1 B_1$ la ligne $B_1 P_1$ jusqu'à son intersection avec la verticale A_1 . Elle y intercepte le segment z' qu'on relève, et qui donne verticalement le point F . Les réactions successives donnent la ligne KK des intersections.

Le moment fléchissant dans une section X' de la poutre a pour ligne d'influence la somme algébrique du triangle des actions verticales statiques et de la courbe due à la tension H . Pour que le moment s'annule, il faut que la réaction R coupe le câble dans la section X' . Le point nul de la surface d'influence est alors verticalement sous l'inter-

section de cette réaction avec la ligne KK . Son sommet se trouve sous la section X' . Nous pouvons donc la tracer. Pour calculer l'échelle de cette surface, nous avons l'ordonnée η de son sommet, qui représente le moment $1^t \cdot x \cdot x' : l$ d'une force $P = 1^t$ agissant en X' sur la travée libre du câble.

Les lignes d'influence des efforts dans le câble et les tiges de suspension b, c , etc., dépendent seulement de celle de la tension H . Pour savoir dans quelle proportion, on fait agir en A^* et B^* une force $H = 1^t$ et l'on cherche son action dans les éléments successifs du câble. Les composantes verticales du polygone $H = 1^t$ donnent les efforts des suspensions et pour la barre c par exemple, nous avons l'effort

$$C = P \cdot \frac{z}{m} \cdot \frac{c}{1}$$

Le maximum de H donne le maximum de toutes ces forces.

La réaction d'appui de la poutre, soit la force a du suspensoir fictif, est égale à la réaction verticale totale V en A^* diminuée de la composante verticale à fournir par le câble 1.

Le calcul des forces transversales agissant dans la poutre raidissante dépend aussi du polygone $H = 1^t$. La force Q_1 , du premier champ, soit la réaction d'appui elle-même,

est égale à $P \left[\frac{k}{l} - \frac{z}{m} \cdot \frac{a'}{1} \right]$ soit

$$Q_1 = P \cdot \frac{a'}{m} \left[\frac{k}{l} \cdot m \cdot \frac{1}{a'} - z \right]$$

On trouve l'ordonnée v_1 de cette surface sous A_1 en faisant $k = l$. On mesure alors v_1 dans le polygone $H = 1$ comme abscisse du segment vertical, égal à m , intercepté entre l'horizontale H et le rayon 1. L'échelle de cette surface d'influence est alors a'/m où a' se mesure à l'échelle des longueurs comme m , si la distance $H = 1$ est l'unité de longueur, et l'on a

$$Q_1 = (A) = P(a) \cdot \frac{a'}{m}$$

On aurait de même

$$Q_2 = P \cdot q \cdot \frac{a' - b}{m}$$

en portant sous A_1 le segment v_2 déterminé dans le polygone $H = 1$ par le rayon 2. L'influence de la force H y est diminuée par l'augmentation de v . Vers le milieu, la droite se redresse, pour s'incliner en sens inverse dans la seconde moitié de la travée.

Comme on le voit, les lignes d'influence indiquent des moments négatifs pour certains cas de charge, ainsi que des réactions négatives d'appui (A). Si les charges fixes ne pouvaient équilibrer ces réactions négatives d'appuis, il faudrait effectivement prévoir la suspension a , faute de quoi l'état d'équilibre du système ne serait plus ce que le calcul donne dans l'hypothèse de barres rigides.

Influence de la température. Une élévation de température de t° produit un changement de distance entre A^*

et B^* égal à atl . Si l'allongement est positif, il s'ensuit une diminution T de la tension horizontale, soit $T \cdot m \cdot \Sigma(w) = atl$ le déplacement, ce qui donne

$$\pm T = \alpha t \cdot l : m \Sigma(w).$$

Appuis élastiques et continuité. Si au lieu d'un ancrage fixe du câble raidi, nous trouvons en A l'extrémité d'un câble d'ancrage ou d'une nouvelle travée suspendue, la force H sera diminuée par le déplacement élastique du chariot. Ce déplacement devant s'ajouter dans l'épure au segment e mesuré sur la corde A^*B^* , il en résulte une augmentation de l'ordonnée m du centre S qui se trouve reporté en S' . Cette augmentation de m à m' est proportionnelle à la diminution de H . Nous avons trouvé comme déplacement la valeur $2c_2e$, le polygone n'intéressant que la moitié du système, vu la symétrie. Supposons nos deux appuis élastiques. S'ils le sont inégalement, nous compléterons notre polygone funiculaire. Sinon, et c'est ce que nous supposons ici, nous nous bornerons à la moitié.

Soit Hgi^2 le déplacement horizontal infligé à l'appui A par la force H cherchée. Pour le porter au dessin à la même échelle que l'allongement A^*B^* , nous le divisons par la distance polaire c_2 , ce qui nous donne comme segment additionnel

$$e' = gi^2 : c_2$$

et c'est par l'extrémité du segment agrandi que nous menons une parallèle à la tangente extrême. Le point d'intersection avec la verticale de symétrie, soit avec l'autre tangente déplacée ou non, nous donne la nouvelle valeur m' à attribuer à m . La réaction horizontale sera dès lors

$$H = P \cdot z : m'$$

où m' est plus grand que m , du fait de l'élasticité des appuis. Nous ne possédons du reste de ces éléments d'appuis que le produit gi^2 , c'est-à-dire le déplacement. Si nous voulons en déduire le poids élastique de forme gi , nous trouvons une valeur nulle, le rayon de giration i étant infiniment grand. C'est pourquoi l'on doit mener une parallèle au dernier côté de la ligne élastique. La somme des poids w ne change pas, mais bien leur moment statique qui augmente de gi^2 et fait descendre le centre de gravité S .

Exemple numérique. Nous avons appliqué la méthode qui précède au calcul du pont suspendu de Langenargen, au lac de Constance, et c'est lui qui nous a fourni les données de noire épure.

Le câble a une section métallique de 80 cm². La poutre raidissante a comme membrure supérieure un fer à U PN 18 et comme membrure inférieure une section en T ayant une âme de 200.6 mm., 2 cornières inégales PN 6 1/2 . 10 et une semelle de 210.6 mm. Le moment d'inertie de la poutre entière est de 134900 cm⁴. Le coefficient d'élasticité est de 2150 t/cm² tant pour le câble que pour la poutre.

Les éléments w_s de la poutre ont donné les valeurs 0,78, 1,85, 2,85, 3,75, 4,60, 5,35, 5,95, 6,45, 6,95, 7,30, 7,55 et 7,70, le tout multiplié par 10⁻⁴ et en allant des segments 1 à 12. La somme est

$$\Sigma(w_s) = 10^{-4} \cdot 61,08 \text{ cm}^0 \text{ t}^{-1}$$

pour la moitié de la poutre.

Les éléments w_t du câble ont donné comme somme

$$\Sigma(w_t) = 10^{-4} \cdot 0,24,$$

soit une valeur négligeable à côté de la première. Les polygones funiculaires n'ont pu en tenir compte. La somme est

$$\Sigma(w) = 10^{-4} \cdot 61,32$$

pour le demi-arc. La distance polaire c_1 est prise égale à $2 \times 61,32 \cdot 10^{-4}$ et la distance c_2 est égale à $50 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^0 \text{ t}^{-1}$.

L'ancrage est élastique et donne, avec la section de câble indiquée et une longueur horizontale de 17m,50, un déplacement horizontal

$$\Delta h = 1750 : 2150 \cdot 80 = 10^{-2} \cdot 1,02 \text{ cm}^1 \text{ t}^{-1}$$

et nous portons la longueur $\Delta h : c_2$, soit

$$e' = 1,02 \cdot 10^{-2} : 50 \cdot 10^{-4} = 2,04 \text{ cm}.$$

Cette longueur e' est trop petite à l'échelle pour paraître sur l'épure, nous l'avons fortement majorée pour différencier m' de m . Mais de fait, l'ancrage est rigide. Seulement sa présence augmente les allongements dus à la température, qui se calculent sur la longueur totale de 98 m. Pour 25° d'écart, nous avons un allongement de 1/3240 soit 3,03 cm. L'allongement A^*B^* pour $H = 1^t$ est

$$m' \cdot \Sigma(w) = 740 \cdot 2 \cdot 61,32 \cdot 10^{-4} = 9,1 \text{ cm}.$$

et nous trouvons comme tension

$$T = 3,03 : 9,1 = 0,34^t.$$

Cette valeur très faible provient de la légèreté de la poutre raidissante, trop déformable.

Les installations électriques pour l'exploitation et l'éclairage dans le grand tunnel du Simplon.

Par E. ROD,
inspecteur des télégraphes aux C. F. F.

Indépendamment de la traction électrique, l'équipement du tunnel du Simplon a exigé l'installation, tant dans le tunnel lui-même que dans les gares de Brigue et d'Iselle, de nombreux appareils électriques pour la correspondance, les signaux, le contrôle de la marche des trains et l'éclairage.

Pour ces installations, on a posé 4 câbles de Brigue à Iselle et un certain nombre de câbles locaux dans ces deux gares ainsi qu'à la station d'évitement du tunnel.

1. CABLES

1. Câbles pour appareils à faible courant, reliant les gares de Brigue et d'Iselle.

Ils sont au nombre de trois, savoir:

- un câble pour le télégraphe;
- un câble pour le téléphone kilométrique, les cloches-signaux et divers autres appareils;
- un câble pour le bloc-système, utilisé en outre pour une communication téléphonique directe.

Dans l'étude de la question, on avait envisagé l'éventualité, qui s'est réalisée dès lors, de la traction électrique à