

**Zeitschrift:** Bulletin de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes  
**Band:** 13 (1887)  
**Heft:** 6

**Artikel:** Étude des chemins de fer funiculaires  
**Autor:** Vautier, Alph.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-13729>

#### **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:** 09.02.2026

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

## BULLETIN

DE LA SOCIÉTÉ VAUDOISE

## DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

PARAISANT 8 FOIS PAR AN

**Sommaire** : Etude des chemins de fer funiculaires, par Alph. Vautier, ingénieur. (Suite, avec planche, N<sup>o</sup> 8.) — Chauffage des wagons. — Ligne téléphonique souterraine. — Jauge des navires.

## ÉTUDE DES CHEMINS DE FER FUNICULAIRES

par ALPH. VAUTIER, ingénieur.  
(Suite.)

## Démarrage et arrêt des trains.

Nous avons déterminé le profil et la charge d'eau qui assurent l'uniformité du mouvement des trains. Il nous reste à voir comment ceux-ci acquièrent la vitesse initiale.

Le premier moyen qui se présente à l'esprit consiste à ajouter au poids d'eau un surpoids  $q$  calculé de manière à donner aux trains une vitesse  $v$  après un trajet de longueur  $l''$ .

En conservant les notations précédentes et en nommant  $G$  le poids des galets en mouvement et de la poulie, le surpoids d'eau a pour valeur

$$q = \frac{(P + P' + Q + pL + G) v^2}{2g l'' \sin \alpha - v^2} \quad (10)$$

ce qui exprime que le travail du surpoids  $q$  donne à l'ensemble des pièces en mouvement la puissance vive correspondant à la vitesse  $v$ .

En appliquant cette formule à l'exemple traité ci-dessus et en faisant  $l'' = 100$  m.,  $v = 4$  m. et  $G = 3000$  kg., on obtient  $q = 1686$  kg.

Ainsi chaque course dépenserait  $5200 + 1686$  kg. d'eau, soit  $6^{m}39$ .

Sous l'action de cette force supplémentaire les trains prendraient une vitesse accélérée qui devrait être rendue uniforme par l'action des freins.

Dans les applications, il conviendrait de majorer cette valeur de  $q$  afin de tenir compte du frottement au départ qui est un peu supérieur au frottement en marche.

On le voit, ce moyen de donner l'impulsion aux trains est onéreux et on devra lui préférer le système suivant :

Ce second moyen consiste à augmenter la pente du profil en long théorique, sur une certaine longueur aux abords de la station supérieure. Le train-moteur acquiert ainsi au moment de son départ une force de traction supérieure à celle que nous avons trouvée nécessaire pour équilibrer le train inférieur et vaincre les frottements de roulement.

Reportons-nous à la fig. 3 et désignons par  $H + h'$  la hauteur de la station supérieure  $S'$ .

Les pentes sont tracées d'après l'équation (9) entre les points  $R$  et  $S$ , mais la partie supérieure a une pente plus forte sur une longueur  $l''$  pour aboutir à la station  $S'$ .

Soit  $tg \alpha'$  la pente entre  $T$  et  $S'$  et  $tg \alpha$ , celle qu'elle remplace entre  $T$  et  $S$ , nous avons

$$h' = l'' (\sin \alpha' - \sin \alpha)$$

Le train-moteur descend entre  $S'$  et  $T$  d'une hauteur  $h'$  plus grande que celle nécessaire pour équilibrer le train inférieur et vaincre les frottements, ce qui donne un travail moteur supplémentaire

$$(P' + Q + \frac{h'}{2} p) h'$$

La puissance vive acquise par les trains, le câble et les galets à la fin du parcours  $l''$  est

$$\frac{P + P' + Q + Lp + G}{2g} v^2$$

En écrivant que ces deux quantités sont égales et en négligeant le terme  $\frac{h'}{2} p$  qui est insignifiant auprès des autres forces, nous avons la relation :

$$h' = \frac{P + P' + Q + Lp + G}{2g (P + Q)} v^2 \quad (11)$$

La quantité  $Q$  est donnée par l'équation (5) en fonction de  $H$  et nous connaissons la hauteur totale  $K = H + h'$  de la station supérieure au-dessus de l'inférieure ; c'est une donnée fondamentale du problème.

Nous avons donc les deux équations :

$$K - H = \frac{P + P' + Q + Lp + G}{2g (P' + Q)} v^2$$

$$Q = \frac{(P - P') H + (P + P') Lf + GL}{H - fL}$$

qui déterminent les quantités  $Q$  et  $H$  et par suite  $h'$ . Leur résolution est facile à faire numériquement ou même par simple tâtonnement en prenant pour première valeur de  $Q$  celle, un peu trop faible, qui correspondrait à  $H = K$ .

Les valeurs de  $Q$ , de  $H$  et de  $h'$  ainsi déterminées, et le profil en long étant construit entre  $R$  et  $T$  d'après l'équation (9) et se terminant par la pente  $T S'$  on est assuré que le train-moteur entraînera l'autre train avec une vitesse croissante de  $S'$  en  $T$  et qu'il parcourra le reste de la ligne jusqu'à une distance  $l''$  de  $R$  avec la vitesse uniforme  $v$  qu'on s'est fixée.

Le reste du parcours aura lieu avec une vitesse décroissante, car le train montant parcourt la pente  $T S'$  et ce n'est que grâce à la puissance vive que la course peut s'achever.

L'équation des travaux des forces qui ont agi pendant toute la course est :

$$(P' + Q - P)H + (P' + Q - P)h' - (P + P' + Q)Lf - CL = \Sigma F$$

Or notre profil théorique réalise la condition

$$(P' + Q - P)H - (P + P' + Q)Lf - CL = 0$$

d'où  $(P' + Q - P)h' = \Sigma F$ .

La quantité  $\Sigma F$  représente le travail des freins, il sera toujours positif car  $P < P' + Q$ , il s'exerce sur la longueur  $l''$  aux abords de R. La pression exercée par les freins dans le sens de la voie, sur les dents de la crémaillère ou sur les rails, aura une intensité  $\frac{\Sigma F}{l''}$ .

Ce travail est très faible et il est utile d'avoir à sa disposition un excès de force afin d'arriver aux quais des stations. Il n'est, en effet, pas possible pratiquement de proportionner très exactement la charge d'eau et d'évaluer la charge du train montant et les frottements du système ; la vitesse peut par conséquent être inférieure à celle prévue et la puissance vive deviendrait insuffisante pour achever la course.

Lorsqu'on aurait établi le profil en long selon les prescriptions théoriques qui précèdent, on sera assuré de réaliser la traction avec la plus grande économie d'eau et d'usure des freins et il sera même prudent de donner aux réservoirs d'eau une contenance un peu supérieure à celle strictement nécessaire afin de pouvoir disposer, si l'expérience le montre utile, d'un surplus de pouvoir moteur.

Il serait donc oiseux de chercher à annuler complètement le rôle des freins, nous nous bornerons à dire qu'on y arriverait facilement en combinant un adoucissement de la pente inférieure avec une augmentation de la pente supérieure.

En appliquant nos données numériques aux formules obtenues on a : en faisant  $v = 4$  m. et  $l'' = 100$   $h' = 1^{m}90$  d'où  $K = 201^{m}90$ ,  $\sin \alpha' = 0,165$   $\Sigma F = 1619$  km. et la pression des dents sur la crémaillère  $16^{kg}19$ .

La vitesse avec laquelle le train aborderait le heurtoir terminal, si l'on ne faisait pas usage des freins, serait de  $1^{m}28$  par seconde.

Nous avons fait abstraction jusqu'ici des stations intermédiaires qui pourraient être desservies par les trains. L'arrêt occasionnant la perte de la puissance vive, il est nécessaire de la restituer aux trains, soit par le moyen d'une augmentation de la charge d'eau, soit en aggravant la pente de la voie dans la station et sur une certaine longueur en aval. On calculerait le surpoids d'eau et la hauteur  $h'$  comme il a été dit pour les stations extrêmes.

Dans le cas où l'on employerait un surpoids d'eau  $q$ , le profil en long ne serait aucunement modifié.

Dans le cas d'une aggravation de pente, chaque station occasionnerait le relèvement de toute la partie du profil située en amont.

S'il y avait, par exemple, deux stations intermédiaires, équidistantes du croisement, on aurait pour ordonnées du profil de la voie les valeurs de  $y$  données par l'équation 9 entre R et la première station. Entre celle-ci et la suivante les ordonnées seraient  $y + h'$  et pour la fin du tracé jusqu'en T  $y + 2h'$ .

La hauteur totale  $K = 3h' + H$ .

On en déduirait H comme il a été dit ci-dessus.

### B. Profil en long de formes diverses.

Dans l'étude du profil en long théorique, nous avons fait abstraction de la forme du terrain naturel afin de chercher les conditions les plus favorables à l'exploitation. Ce profil sera parfois réalisable, car on rencontre assez souvent des flancs de coteau dont la pente décroît vers la base. Dans d'autres cas on devra se résoudre à adopter un profil moins avantageux et même à renoncer au système de contrepoids d'eau pour adopter un moteur.

Lorsqu'il n'est pas possible d'adopter le profil théorique, on devra chercher à réaliser la condition de symétrie des pentes exprimées par les équations 1 à 3 que nous avons données ci-dessus.

Le procédé le plus simple de les étudier consiste à se donner le point de croisement dont la hauteur au-dessus de l'extrémité inférieure doit être moindre que  $\frac{H}{2}$ , puis de choisir une pente,  $\sin \gamma$ , pour cette partie de la voie ; l'équation 3 donnera la valeur du contrepoids d'eau, pour  $F'' = 0$  :

$$Q = \frac{(P - P') \sin \gamma + (P + P') f + C}{\sin \gamma - f}$$

Nous nous donnons de même la condition que les freins n'ayant à agir dans la partie inférieure du tracé que pour détruire la puissance vive au moment d'entrer en station, on a donc d'après l'équation (2)  $F' = 0$  et

$$(P' + Q) \sin \beta - P \sin \alpha + p H - (P + P' + Q) f - C = 0$$

Nous nous donnons  $\sin \beta$ , c'est-à-dire la pente de la partie inférieure du tracé, ce qui détermine celle de la partie supérieure  $\sin \alpha$ .

L'équation (1) donnera la valeur de  $F$  c'est-à-dire la force motrice qui n'est pas absorbée par le train montant et les frottements du système. Cette force doit être positive. Si elle était négative cela indiquerait que  $\sin \beta$  est trop grand ou  $Q$  trop petit pour cette partie du tracé. Si elle était nulle on ne disposerait d'aucune force pour démarrer les trains et leur donner la vitesse voulue.

Lorsque  $F$  est positif on déterminera la longueur  $l''$  du parcours au bout duquel les trains auront acquis la vitesse  $v$  en employant la formule déjà expliquée :

$$F l'' = \frac{P + P' + Q + p L + G}{2g} v^2$$

Au delà de cette longueur les freins exercent sur la crémaillère une pression égale à  $F$ .

Si les résultats de cette première étude sont convenables on achèvera l'étude du profil en distribuant les pentes selon les conditions de l'équation (2) en s'assurant toujours que l'équation (1) donne à  $F$  des valeurs nulles ou positives.

Dans le tracé du profil en long on ne devra pas perdre de vue que les pentes successives doivent être raccordées par des arcs paraboliques ou des arcs de cercle à grands rayons, ainsi que nous le verrons au § 4 ci-après.

Ces diverses conditions sont réalisées par les deux profils types fig. 4 et 5 ; dans la première de ces figures la pente maximale est au haut du plan incliné, dans la seconde elle se trouve au croisement. Dans tous les cas on doit avoir  $\alpha > \beta$ .

En appliquant au type fig. 4 les données numériques indiquées dans notre exemple de profil théorique nous aurons les résultats suivants :

Si la pente du terrain naturel au croisement est de 0,05 nous aurons  $\sin \gamma = 0,05$  d'où  $Q = 7340 \text{ kg.}$ ; nous nous donnons en outre  $\sin \beta = 0,20$  ce qui exige que  $\sin \alpha = 0,273$  et  $F = 1248 \text{ kg.}$

Ce profil est donc plus défavorable que le profil théorique au point de vue de la dépense d'eau, mais sera parfois moins coûteux à construire.

### § 2. Plans automoteurs.

Les plans automoteurs ne diffèrent des plans inclinés à contrepoids d'eau que par la nature de la charge motrice. Ils ont reçu de nombreuses applications dans les exploitations de mines ou carrières situées à flanc de coteau. Les wagons montants sont vides ou à peu près vides, tandis que le wagon descendant est chargé de matériaux. On n'a plus à rechercher les conditions qui rendent  $Q$  un minimum, mais au contraire celles qui permettent le plus fort chargement des wagons descendants compatible avec la sécurité.

Les équations d'équilibre des forces et des travaux N°s 1, 2, 3, 4, sont applicables au cas présent à la seule différence que  $Q$  désignera la charge de matériaux et que  $P$  et  $P'$  sont habituellement égaux.

Il est évident que le profil en long le plus favorable sera celui qui rendra nul le travail des freins, ou qui le restreindra à annuler la puissance vive à la fin de la course. Nous nous retrouvons ainsi dans des conditions identiques à celles qui nous ont amené au profil dit *théorique* et aux conditions des profils de diverses formes examinés ci-dessus.

Les wagons n'étant pas accompagnés par des serre-freins, on agit sur le câble au moyen de freins à ailettes, ou autres, placés à la station supérieure. Ces freins peuvent être beaucoup plus puissants que ceux à crémaillère fixés aux wagons. Il en résulte que la distribution des pentes a beaucoup moins d'importance que dans le système à contrepoids d'eau.

### § 3. Plans inclinés avec moteur.

Ce système a l'avantage de s'accommoder de profils en long qui seraient très défavorables au système à contrepoids d'eau et de permettre l'emploi de trains composés de plusieurs voitures lourdement chargées et de diverses provenances. Tel est le cas du funiculaire de Lausanne à Ouchy qui est actionné par un moteur hydraulique. Le train montant est parfois de 40 tonnes tandis que le train descendant est de 20 tonnes. Il admet des wagons provenant des chemins de fer ordinaires. Dans le cas où l'on eût voulu faire le même service avec un contrepoids d'eau, le volume des réservoirs aurait été de 60 mètres cubes. Il serait impossible de les loger sous les trois voitures qui forment le train normal.

En conservant les notations employées dans l'étude des chemins à contrepoids d'eau, et en désignant par  $D$  la force de traction exercée sur le câble par le moteur, l'équation d'équilibre des forces est :

$$D + P' \sin \alpha = P \sin \beta + p h + (P + P') f + C + F$$
  
l'équation des travaux pour la course entière est

$$D L + (P' - P) H - (P + P') L f - C L = \Sigma F$$

Il est évident que la force en chevaux du moteur et sa consommation d'eau ou de charbon seront des minima si  $\Sigma F$  est nul et si le travail par seconde  $D v$  est constant sur toute la ligne. Lorsque  $v$  est constant  $D$  doit l'être aussi et nous nous retrouvons dans des conditions semblables à celles qui nous ont conduit à l'équation (9) de la courbe du profil théorique.

Dans notre cas

$$M = \frac{D - (P + P') f - C}{P - P'}$$

$$\text{et } N = \frac{p}{P + P'}$$

Pour un profil quelconque on recherchera quelle est la position des trains qui donne à  $D$  sa valeur maximale en calculant la formule

$$D = [P \sin \beta - P' \sin \alpha \pm p h + (P + P') f + C]$$
  
dans laquelle le terme  $p h$  est positif lorsque le train descendant est en amont du croisement et négatif quand il est en dessous.

Le démarrage exige du moteur une force supplémentaire

$$d = \frac{P + p l'' + G}{l''} \frac{v^2}{2g}$$

$l''$  et  $G$  désignant la longueur de câble et le poids des galets compris entre le moteur et la station d'où part le train montant.

La force du moteur et sa dépense en eau ou charbon dépendent du produit  $D v$  et non de la traction  $D$ . On aura donc la ressource de réduire la vitesse dans les parties du tracé où  $D$  est maximum et l'on obtiendra ainsi un travail à peu près constant du moteur. Les freins ne sont employés que pour les cas de rupture de câble et pour détruire la puissance vive des trains au moment où le moteur s'arrête. On évite ainsi des à coup dangereux pour le câble. En résumé, la forme du profil en long la plus avantageuse pour un funiculaire à moteur est encore le profil théorique déterminé ci-dessus, mais on peut s'en écarter avec moins d'inconvénients que pour les funiculaires à contrepoids d'eau.

### § 4. Raccordement des pentes.

Les raccordements de deux pentes successives du profil en long sont convexes ou concaves, dans le premier cas la tension produite sur le câble n'a d'autre résultat que de l'appliquer plus fortement sur ses galets de support et nous verrons plus loin quelle est l'intensité de cette force.

Lorsque la courbe est concave la traction opérée par le poids des trains tend à soulever le câble et il importe qu'il ne sorte pas de la gorge de ses galets.

En effet, lorsque le câble se détend il est très exposé à tomber à côté des galets et à s'y détériorer gravement par son frottement contre leurs paliers et sur l'aire de la voie. L'action du vent et surtout la traction oblique produite par les sinuosités de la voie amènent ce résultat. Nous avons donc à déterminer la courbe que forme un câble soumis à la plus forte tension qui puisse se produire dans l'exploitation d'un chemin de fer funiculaire. Les galets devront être disposés selon cette courbe ou au-dessus d'elle, mais jamais en dessous.

On sait qu'un fil homogène suspendu librement et soumis à une tension forme une courbe nommée chaînette. Lorsque la flèche de cette courbe est petite relativement à sa longueur,

elle se confond avec une parabole, car on peut considérer le poids du fil ou du câble comme uniformément réparti sur la corde.

En désignant par  $p$  le poids du câble par mètre courant, son poids par mètre courant de projection horizontale sera

$$p_1 = \frac{p}{\cos \alpha}$$
 en désignant par  $\tan \delta$  la pente moyenne de la région considérée.

Soient  $S_A$  et  $S_B$  (fig. 6) les directions des deux forces qui tendent le câble, elles sont parallèles aux deux lignes de pentes à raccorder et font avec l'horizontale les angles  $\alpha$  et  $\alpha'$ . Le point  $S$  est déterminé ainsi que ces pentes et le poids  $p_1$  du câble; nous nous proposons de calculer les longueurs des tangentes à la parabole  $S_A$  et  $S_B$ , l'équation de la courbe, la hauteur  $S_n$  et la flèche  $nm = f$ . L'arc parabolique  $A_B$ , rapporté à l'horizontale et à la verticale passant par  $A$ , a pour équation :

$$y = (d + 4f) \frac{x}{l} - 4f \frac{x^2}{l^2} \quad (1)$$

Il appartient à une parabole dont l'axe est vertical et dont le sommet a pour ordonnées

$$x_1 = \frac{d + 4f}{8f} l \text{ et } y_1 = \frac{(d + 4f)^2}{16f}$$

ainsi qu'il est aisément de le prouver par les propriétés bien connues de cette courbe, mais nous ne nous y arrêterons pas. Les dérivées de l'équation de la courbe donnent

$$\tan \alpha = \frac{d + 4f}{l} \quad \tan \alpha' = \frac{d - 4f}{l}$$

En additionnant ces deux valeurs on a  $d = \frac{l}{2}(\tan \alpha + \tan \alpha')$  (2)

$$\text{en les retranchant l'une de l'autre} \quad f = \frac{l}{8}(\tan \alpha - \tan \alpha') \quad (3)$$

Ecrivons maintenant les équations d'équilibre des forces

$$\text{autour de } A \quad \frac{p_1 l^2}{2} - V_1 l - H d = 0$$

$$\text{autour de } n \quad \frac{p_1 l^2}{8} - H \left( \frac{d}{2} + f \right) - V_1 \frac{l}{2} = 0$$

$V_1$  désigne ici la composante verticale de la tension  $T_1$  en  $B$  et  $H$  la composante horizontale qui est, on le sait, la même en tous les points de la parabole.

On tire de ces deux équations la valeur de  $V_1$  puis celle de

$$H = \frac{p_1 l^2}{8f} \text{ d'où } f = \frac{p_1 l^2}{8H}$$

$$\text{Or } H = T_1 \cos \alpha' = T \cos \alpha \text{ d'où } f = \frac{p_1 l^2}{8 T_1 \cos \alpha'}$$

en remplaçant  $f$  par cette valeur nous obtenons :

$$l = \frac{T' \cos \alpha'}{p_1} (\tan \alpha - \tan \alpha')$$

$$\text{ou } l = \frac{T \cos \alpha}{p_1} (\tan \alpha - \tan \alpha') = \frac{T}{p} (\tan \alpha - \tan \alpha') \quad (4)$$

Nous ne nous arrêterons pas à prouver que le sommet d'angle des pentes  $S$  se trouve à égale distance  $\frac{l}{2}$  des verticales passant par  $A$  et par  $B$ . Cette propriété des tangentes à la parabole dérive facilement de son équation générale.

La longueur  $l$  étant déterminée par les données du problème,

on calculera les valeurs de  $d$  et de  $f$ . On en déduira la longueur des tangentes

$$S_A = \frac{l}{2 \cos \alpha} \quad S_B = \frac{l}{2 \cos \alpha'} \quad (5)$$

et la hauteur  $S_n = \frac{2}{l} \tan \alpha - \left( \frac{d}{2} + f \right)$ . En remplaçant  $d$  et  $f$  par leurs valeurs (équations 2 et 3) on trouve  $S_n = f$ . (6)

La courbe de raccordement est ainsi entièrement déterminée par les équations N°s 1 à 6 ci-dessus. Elle pourra être piquetée sur le terrain aussi facilement qu'un raccordement en arc de cercle. On peut, du reste, substituer à la parabole un arc de cercle à condition de s'assurer qu'aucun des points du raccordement ne soit en contre-bas de la parabole.

La longueur du câble entre les points  $A$  et  $B$  est égale à

$$l + \frac{d^2}{2l} + \frac{8f^2}{3l}$$

La longueur horizontale du raccordement désignée ci-dessus par  $l$  dépend, comme nous le dit l'équation 4, du rapport  $\frac{T}{p}$ , c'est-à-dire de la tension maximale que peut supporter avec entière sécurité un câble de 1 km. par mètre. Ce rapport varie beaucoup avec la qualité du fer. Les meilleurs câbles d'acier ne rompent que sous une charge égale à 16 400 fois leur poids par mètre courant, ceux d'une fabrication ordinaire ne supportent que 11 800 fois leur poids par mètre courant. En admettant que la tension maximale du câble au moment des arrêts et des démarriages les plus brusques ne doive pas dépasser le  $\frac{1}{5}$  de la charge de rupture, la valeur de  $\frac{T}{p}$  sera au minimum de 2360 et peut atteindre 3280 avec les meilleurs aciers. Cette valeur servira pour l'étude du profil en long d'un avant-projet avant que de connaître  $T$  et  $p$ .

On constatera que le profil théorique étudié au § 1<sup>er</sup> a toujours une flèche moindre que celle strictement nécessaire pour que le câble reste sur ses galets. Dans notre exemple numérique, il faudrait une tension de 84 300 kg. environ pour tendre un câble de 1 kg par mètre sur 1500 m. de longueur jusqu'à ce que sa flèche soit de 5 m. comme celle de notre profil. Or la tension maximale ne dépassera pas en pratique 4000 kg.

La formule à employer pour cette vérification est  $T = \frac{p L^2}{8f}$ , elle dérive de la valeur  $f = \frac{p_1 l^2}{8 T_1 \cos \alpha'}$  dans laquelle on remplace  $p_1$  par  $\frac{p}{\cos \alpha'}$ , et  $l^2$  par  $L^2 \cos^2 \alpha'$ .

On n'aura donc à se préoccuper de raccorder les pentes que dans l'étude de profils qui s'écartent du profil théorique, tels que ceux décrits au § 1<sup>er</sup>, B.

Il peut arriver que le voisinage d'une traversée de route au-dessus de la voie ferrée, ou telle autre circonstance, empêche d'établir le raccordement des pentes d'une manière satisfaisante.

Dans ce cas, on devra maintenir le câble sur ses galets au moyen de galets auxiliaires placés au-dessus du câble, mais laissant libre passage au wagon. Au Territet-Glion, on a adopté un système fort ingénieux, qui fonctionne bien, mais a l'incon-

vénient d'exiger l'arrêt momentané du train à chaque passage près de l'appareil.

Le galet auxiliaire est monté sur un long bras qui est horizontal dans sa position normale et pivote autour d'un axe incliné placé en dehors de la voie. Le wagon montant rencontre le bras placé en travers de la voie, il l'aborde doucement et le range de côté. Le wagon descendant le replace au-dessus du câble dès qu'il a passé.

Le poids de l'appareil exige que ces mouvements automatiques s'opèrent sans vitesse, de sorte que ce système n'est pas admissible sur un funiculaire à moteur ou automoteur dont les arrêts sont commandés dès l'extrémité de la ligne. Nous proposerions de préférence le système esquissé, fig. 7, qui serait moins coûteux et n'exigerait aucun arrêt des trains. Il restreindrait, il est vrai, la place libre sous le wagon, ce qui serait parfois gênant pour placer des réservoirs d'eau.

Au-dessus du point S, où se coupent les lignes de pentes, on placerait un galet sans gorge G porté par un axe horizontal en porte à faux et, à quelque distance, deux galets coniques, A et B. Entre ceux-ci la voie serait déviée d'une quantité suffisante pour que l'amarre du câble puisse passer à côté du galet G. Le wagon descendant pourrait ainsi trajeter librement; puis, lorsqu'il aurait dépassé le point B, le câble, raidie par la tension, viendrait s'engager sous le galet G qui empêcherait tout soulèvement ultérieur.

### CHAPITRE III

#### Résistances au mouvement des trains.

Nous avons à évaluer les résistances que les trains et le câble opposent au mouvement et qui figurent dans nos formules des §§ 1, 2 et 3 sous lettres f et C.

##### § 5. Valeur du coefficient f.

Nous avons désigné ainsi le coefficient de résistance au roulement sur une voie de niveau. Il dépend de l'état de la voie, de la construction du wagon et de son graissage. Parmi les nombreuses formules proposées pour le déterminer, nous signalerons celle établie, pour les voitures de voyageurs, par M. l'ingénieur Desdouits, (*Annales des ponts et chaussées* 1886.) En employant le matériel ordinaire des chemins de fer, dans leur état de graissage usuel, il est arrivé à

$$f = 1^{kg} 6 + 0,0003 V^2$$

f désigne le frottement par tonne, V est la vitesse en kilomètres à l'heure.

Pour une vitesse de 4 m. par seconde,  $f = 1^{kg} 67$  par tonne. Le passage dans une courbe de 500 m. de rayon augmenterait cette résistance de 1 kg. au maximum par tonne.

Dans nos applications, nous avons fait  $f = 3$  kg. par tonne, en tenant ainsi compte, autant que faire se peut, de la résistance supplémentaire opposée par les freins à crémaillère dont le frottement peut être très minime lorsqu'ils sont entièrement desserrés.

##### § 6. Valeur de C.

Nous avons désigné ainsi la force nécessaire pour faire mouvoir le câble sur ses galets, en admettant qu'il est assez tendu pour ne toucher le sol en aucun point.

En l'absence d'expériences directes, nous chercherons à évaluer cette force de la manière suivante :

a) Dans les parties de la voie en alignement droit et en pente uniforme, le câble est supporté par des galets à axes horizontaux et il peut presque être assimilé à une barre rigide, lorsqu'il est tendu.

Si donc nous désignons par D le diamètre de la gorge des galets, par d celui de leurs tourillons et par f' le coefficient de frottement de ceux-ci sur leurs paliers, le câble exigera une

$$\text{force } c = \frac{p L d}{D} f'$$

Le rapport  $\frac{d}{D} = 1/10$  environ et  $f' = 0,08$ .

d'où  $c = 0,008 p L$ . Nous rappelons que p est le poids par mètre courant de câble et L sa longueur.

b) Dans les parties de la voie qui présentent des courbes en plan et dans les raccordements de pentes convexes du profil en long, la tension du câble produit des frottements contre les galets verticaux ou horizontaux. Soit (fig. 8) l la distance entre deux galets, O le centre de la courbe, R son rayon. La tension T du câble qui s'infléchit sur le galet produit une résultante  $= T \frac{l}{R}$  et la force absorbée par chaque galet sera  $\frac{l T}{R} \frac{d}{D} f'$

Pour une courbe ayant un angle au centre  $\beta$  il faudra

$$n \text{ galets, or } \frac{n l}{R} = 2 \pi \frac{\beta}{360^\circ}$$

Les frottements produits par la courbe entière seront donc

$$2 \pi \frac{\beta}{360^\circ} \frac{T d}{D} f' = 0,05 \frac{\beta}{360^\circ} T$$

Il se produira sans doute quelques pertes de force à cause de la raideur du câble. Nous ne saurions comment les apprécier et nous nous bornerons à majorer les résultats obtenus.

c) La poulie au sommet du plan incliné produira une perte

$$\text{de force} = 2 T \frac{d}{D} \times 0,08 = 0,016 T$$

La raideur du câble produira d'après la formule de Redtenbacher une perte de force  $= T \left( \frac{0,109}{D} + \frac{0,203}{T} \right) \delta^2$  dans

laquelle  $\delta$  est le diamètre du câble exprimé en centimètres ainsi que D.

Avec les proportions ordinaires, on peut remplacer cette formule par  $(0,0011 \delta + 0,0005) T$  et même par  $0,004 T$  pour un câble de grosseur moyenne.

d) Les galets sont mis en mouvement les uns après les autres par le câble et prennent très rapidement sa vitesse. Il y a là une force d'inertie à vaincre que nous évaluons à 16 kg. en admettant que le galet pèse 35 à 40 kg. et prenne la vitesse de 4 m. en  $1/2$  seconde.

En additionnant toutes les résistances énumérées ci-dessus et en ayant soin de les majorer pour tenir compte du travail de flexion auquel donne lieu le passage sur chaque galet, nous obtiendrons une valeur suffisamment approchée du terme C qui figure dans nos calculs.

On remarquera que les courbures de la voie nécessaires au croisement des trains et les raccordements de pentes ont une

très faible influence sur la valeur de C. Les quatre courbes d'un croisement donnent une perte de force de

$$0,05 \frac{16^\circ}{360} T = 0,0022 T;$$

un raccordement de pentes de  $8^\circ$  au centre donne une perte de force de 0,0011 T.

La formule suivante dans laquelle nous avons groupé ensemble les coefficients de T donnera la valeur de C et sera applicable à la plupart des tracés :

$$C = 0,008 pL + 0,03 T + 16$$

Telle est approximativement la force absorbée par le mouvement du câble.

La tension T qui entre dans ces calculs est variable, mais il serait bien inutile de tenir compte de cette variabilité dans le calcul de C, qui n'a qu'une influence secondaire dans nos équations d'équilibre. On prendra pour T la tension maximale du câble, abstraction faite de celle nécessaire au démarrage.

#### CHAPITRE IV

### Engins spéciaux, voie et exploitation.

#### § 7. Distance des galets.

Les galets sont de petites poulies à gorge profonde, montés sur des paliers à coussinets de bronze, munis d'un moyen de graissage.

Nous donnons aux fig. 9 et 10 les croquis des galets du Territet-Glion. Le type fig. 9 s'emploie dans les parties rectilignes de la voie, le type 10 dans les courbes du croisement. Il remplace les galets verticaux.

Les galets doivent être assez rapprochés pour que le câble ne traîne jamais sur le sol, même lorsqu'il est mis en mouvement par la plus faible traction qui puisse se réaliser dans l'exploitation de la ligne. Nous calculons cette distance comme suit :

Soit T la tension minimale du câble,  $tg \alpha$  la pente de la voie entre les deux galets A et B (fig. 6), f la hauteur verticale  $mn$  de la gorge des galets au-dessus du sol, p le poids par mètre courant de câble. Nous avons vu au § 4 que la composante horizontale de la tension du câble a pour valeur :

$$T \cos \alpha = \frac{p_1 l^2}{8 f} \quad \text{d'où } l = \sqrt{\frac{8 f T \cos \alpha}{p_1}}$$

En nommant  $l'$  la distance A B, nous avons

$$l' = \frac{l}{\cos \alpha} \quad p_1 = \frac{p}{\cos \alpha} \quad \text{d'où } l' = \sqrt{\frac{8 f T}{p}}$$

Au chemin de fer de Lausanne à Ouchy, les premiers galets étaient en fonte sans aucune garniture, mais on constata bientôt qu'ils s'usaient rapidement et d'une manière irrégulière, ce qui était préjudiciable à la durée du câble. Ils furent successivement remplacés, sur la proposition de notre collègue, M. Cornaz, par des galets munis d'une bague de caoutchouc qui a donné de bons résultats. Le diamètre de la gorge est de 300 mm. Au Territet-Glion, on a préféré garnir le fond de la gorge des galets d'une composition de 10 % de cuivre, 10 % d'antimoine et 80 % d'étain. La gorge a 240 mm. de diamètre.

#### § 8. Le câble.

Les câbles sont généralement préférés aux chaînes à cause de leur beaucoup plus grande résistance à poids égal et surtout parce que les chaînes, même les mieux faites, rompent parfois sans qu'il soit possible de le prévoir.

Les chaînes présentent cependant l'avantage de pouvoir s'enrouler sur des poulies ou pignons de faible diamètre et de fournir sur toute leur longueur des points d'attache.

Les chemins de fer qui transportent des voyageurs mettent la plus grande importance à la sécurité et n'emploient que des câbles.

Depuis qu'on sait fabriquer des fils d'acier de grande longueur, on les préfère aux fils de fer en raison de leur grande résistance et de leur homogénéité.

Ceux employés à la construction des câbles ont un diamètre de  $1 \frac{1}{2}$  à 3 mm. et présentent une telle ténacité qu'ils ne se rompent que sous une charge de 110 à 170 kg. par millimètre carré de section transversale.

En tordant ensemble un certain nombre de ces fils, on obtient un *toron*.

Le câble est composé de plusieurs torons tordus autour d'une âme en chanvre qui lui donne une certaine flexibilité.

D'après des expériences faites au Creuzot, la torsion diminue la résistance des fils, de sorte qu'un câble n'a guère que les  $\frac{4}{5}$  de la résistance totale des fils qui le composent. Lorsqu'on détermine les dimensions à donner à un câble, il faut tenir compte du fait que sa résistance diminue avec l'usure.

Il convient donc de lui donner une section supérieure à celle qu'exigerait la sécurité.

Au Lausanne-Ouchy et au Territet-Glion, les câbles neufs ne travaillent qu'au  $\frac{1}{10}$  de leur charge de rupture. Ce rapport n'a rien d'absolu et nous pensons qu'on pourrait adopter des dimensions moindres pour les chemins de fer à faible trafic.

Les câbles sont revêtus d'une couche de goudron qui prévient la rouille et diminue l'usure. Le mélange de goudron de Norvège, d'huile et de colophane employé au Lausanne-Ouchy et au Territet-Glion donne de bons résultats. Cet enduit doit être renouvelé dès que le câble paraît blanc.

*Usure.* — Le remplacement des câbles constitue une dépense importante, mais il est plus important encore d'éviter toutes chances de rupture de cet organe essentiel. Quelle que soit la puissance des freins, il est toujours à craindre que leur fonctionnement soit tardif lorsque le câble vient à se rompre inopinément. Or tout retard permet au train d'acquérir une puissance vive extrêmement dangereuse.

Il est donc de la plus haute importance d'observer le câble et de se rendre compte fréquemment de sa résistance. On ne peut pas prélever des échantillons sur un câble en service, mais l'expérience a prouvé que la simple observation de l'usure extérieure suffit pour dénoncer le moment où il convient de le remplacer.

On a constaté en effet, en détordant des câbles usagés, que les fils intérieurs s'usent très peu, ils se polissent les uns contre les autres surtout entre torons, mais l'usure de beaucoup la plus importante a lieu à l'extérieur du câble où il est facile de la constater et même de la mesurer pour se rendre compte de la diminution de section métallique.

La qualité des aciers fondus tréfilés varie notablement d'une usine à l'autre et même d'un câble à l'autre de la même usine, aussi ne pouvons-nous pas indiquer de règles générales pour déterminer le moment où un câble doit être remplacé. Le département fédéral des chemins de fer indique, dans sa circulaire de février 1885, « que la tension maximale du câble, y compris la fatigue sur les poulies, ne doit pas excéder le quart de la charge de rupture en tenant compte de la diminution de section par l'usure. » Il serait sans doute plus scientifique d'observer l'allongement du câble sous des charges connues et de le mettre hors de service dès que ces allongements deviendraient permanents, ce qui indiquerait que l'élasticité est altérée, mais le câble, renfermant une âme en chanvre, s'allonge déjà lorsqu'il est neuf et il n'est guère possible de déterminer pratiquement le moment où l'allongement provient de l'extension des fils.

Sur les chemins à faible pente, le mesurage de la longueur est compliqué encore de la résistance variable que les galets opposent à la tension du câble. Nous avons dû y renoncer complètement pour le Lausanne-Ouchy.

La durée moyenne de trois câbles de ce même chemin de fer a été de deux ans, pendant lesquels chacun d'eux a actionné 26 500 trains. Le parcours kilométrique du câble a été donc de 40 000 kilomètres.

Le dernier câble n'a été usé qu'après 1226 jours de service. Son parcours kilométrique a été de plus de 66 000 kilomètres. Il est en acier anglais trempé. Sa longue durée peut être attribuée, au moins en partie, à l'introduction de plus en plus complète de galets à gorge de caoutchouc.

*Calcul de la tension maximale du câble.* — La tension maximale à laquelle le câble peut être exposé se compose des éléments suivants :

1<sup>o</sup> La composante du poids du train et du câble lui-même, augmentée de la force nécessaire pour vaincre les résistances passives.

On aura à chercher quelle est la position du train qui donne la plus grande valeur à l'expression

$$P \sin \alpha + p h + P f + \frac{C l}{L}$$

dans laquelle P désigne comme précédemment le poids du train montant,  $t g \alpha$  la pente de la voie au point considéré, p le poids par mètre courant de câble évalué approximativement, h la projection verticale du brin montant, f le coefficient de frottement du train, C le coefficient de frottement du câble, L sa longueur totale et l celle du brin montant.

Dans l'exemple numérique traité au § 1, on obtient pour la position inférieure du train montant 1743 kg., et pour sa position supérieure 1639 kg.

2<sup>o</sup> Nous avons vu que le démarrage exige une force supplémentaire dont la valeur est pour le train montant  $\frac{P + pl + G}{2gl'} v^2$

formule dans laquelle G indique le poids des galets et poulies supportant le brin montant et l' la longueur parcourue par le train pour acquérir la vitesse v.

Dans notre exemple numérique on aurait pour  $l' = 100$  m. et  $v = 4$  m. une force supplémentaire de 132 kg. à ajouter aux 1743 kg. trouvés ci-dessus, total 1875 kg.

3<sup>o</sup> Le câble subit une certaine fatigue en s'infléchissant sur les galets et sur les tambours et poulies de renvoi.

Reuleaux, dans son ouvrage *le Constructeur*, a cru pouvoir évaluer cette tension par la formule  $S = 10000 \frac{d}{R}$  dans laquelle d désigne le diamètre des fils et R le rayon de la poulie.

Cette formule dérive évidemment d'une assimilation erronée de la flexion d'un fil à celui d'une pièce rigide.

En effet, la théorie de la flexion plane des solides donnerait l'égalité bien connue  $\frac{EI}{R} = \frac{SI}{d}$  d'où  $S = E \frac{d}{2R}$ .

Or  $E = 20000$  par millimètre carré. On aurait donc comme Reuleaux,  $S = 10000 \frac{d}{R}$ .

Si cette assimilation était exacte, un fil de fer ordinaire de 2 mm. de diamètre enroulé sur une poulie de 0<sup>m</sup>20 de rayon devrait rompre, car sa tension s serait de 100 kg. par millimètre carré, ce qui n'a pas lieu. L'expérience prouve qu'on peut enrouler ce fil sur des poulies plus petites encore, sans qu'il présente aucune trace de rupture.

Cette anomalie provient de ce que les formules de la flexion plane des solides sont basées sur plusieurs hypothèses qui ne sont plus admissibles dès que la flexion est très grande relativement aux dimensions du solide. La formule de Reuleaux donne donc des résultats très exagérés pour la fatigue d'un fil courbé sur une poulie.

Si nous considérons un des fils d'un câble, nous remarquerons qu'il décrit une courbe hélicoïdale complexe, car il participe à l'enroulement des torons. Il est tantôt comprimé, tantôt tendu par l'enroulement du câble sur la poulie, de sorte que ces actions peuvent s'annuler par un simple glissement des fils les uns sur les autres. En outre l'âme en chanvre est compressible, ce qui modifie les réactions des fils les uns sur les autres.

Nous en concluons que le phénomène de l'enroulement d'un câble sur une poulie donne lieu à des tensions moléculaires très compliquées, mais dont l'intensité est certainement de beaucoup inférieure à celle indiquée par la formule ci-dessus.

L'influence des galets qui ne font que guider ou supporter le câble est encore plus difficile à apprécier, car celui-ci s'infléchit selon une courbe dont la forme dépend surtout de sa raideur, de sa tension et de son poids.

En résumé, nous estimons qu'on peut négliger l'influence des poulies et galets dans le calcul de la tension maximale du câble, le coefficient de sécurité suffisant largement pour ces tensions d'ordre secondaire.

Il n'en faudrait cependant pas inférer qu'on puisse, sans inconvénient, multiplier les poulies de renvoi, car elles augmentent notablement l'usure du câble.

Nous extrayons de nos notes les dimensions et résistances de quelques câbles employés depuis plusieurs années.

La résistance des fils isolés du meilleur des câbles du Lausanne-Ouchy a atteint 179 kg. par millimètre carré et le câble entier a montré une résistance de 140 kg. par millimètre carré de section métallique. L'expérience des câbles n'est pas encore assez longue pour qu'on puisse définir la qualité d'acier et le genre de trempe qui convient le mieux. Les tréfileries ont fait

de grands progrès depuis quelques années et en feront encore.

CHEMIN DE FER	DIAMÈTRE		NOMBRE		POIDS par mètre Kg.	Charge de rupture par mm <sup>2</sup> de section métallique
	du câble mm.	du fil mm.	de torons	de fils		
Lausanne-Ouchy . .	30	2	6	114	3.20	134
Lausanne-Gare . . .	27	1.8	6	114	2.50	108
Giessbach . . . . .	23	2	5	70	—	107
Territet-Glion . . .	32	1.9	7	133	3.60	145
Lyon-Croix-Rousse	—	2	7	253	—	128

*Amarre du câble.* — Les wagons du funiculaire Lyon-Croix-Rousse sont amarrés au câble par l'intermédiaire d'une grande pièce en fonte dont la forme rappelle le profil d'une poire. Le câble s'enroule autour du gros bout et est épissé sur lui-même vers l'extrémité pointue de l'amarre. Ce système est solide, mais d'une exécution moins facile que celui que nous avons proposé en 1875 pour le Lausanne-Ouchy. Ce système d'amarre était déjà usité et favorablement connu aux Etats-Unis pour fixer les extrémités des câbles des ponts suspendus. Il a été imité dès lors sur plusieurs chemins funiculaires où il a donné les meilleurs résultats. Un serrurier quelconque peut placer facilement le câble dans la pièce d'amarre, car il suffit de détourner l'extrémité du câble après l'avoir enfilé dans le trou tronconique *ab* (fig. 11) puis de replier les bouts des fils sur eux-mêmes et de les agglutiner ensemble en fondant du plomb ou du zinc. Les Américains y chassent en outre des clous, mais cela n'est pas nécessaire. Cette pièce est soutenue par une chaînette afin d'éviter qu'elle ne butte contre les galets. Elle s'accroche par une forte boucle à l'extrémité de la barre d'attelage qui agit sur le châssis du wagon par l'intermédiaire d'un ressort de traction *t* (fig. 13). Planche 8.

La figure 11 donne la forme et les dimensions de l'amarre du Lausanne-Ouchy.

*Epissure.* — Lorsqu'un câble vient à se rompre, ses tronçons peuvent être rejoints au moyen d'une épissure. Pour cela on détord les torons des deux extrémités sur six mètres de longueur par exemple; puis on raccourcit le premier toron de 1 m., le second de 2 m. et ainsi de suite, puis on retord les torons ensemble de manière à croiser les joints. Lorsque ce travail est fait par un ouvrier exercé, le câble ne perd rien de sa solidité et son diamètre reste à peu près le même.

*A suivre.*

#### CHAUFFAGE DES VAGONS

L'ingénieur Foulis a fait des essais d'un système de chauffage de son invention dans les wagons des chemins de fer de Glasgow et du Sud-Ouest anglais.

Il éclaire les wagons au moyen de becs de gaz au-dessus desquels il dispose une petite chaudière.

En dessous des sièges sont placés deux serpentins dont le diamètre intérieur est d'environ 9 cm.

La chaudière et les serpentins sont réunis par deux tuyaux de 6 mm.

Pour établir la circulation de l'eau, la chaudière est munie d'un tuyau à soupape dans lequel l'eau est comprimée et ne peut redescendre dans la chaudière.

L'air à échauffer suit le serpentin de bas en haut et atteint une chaleur de 27 à 32 degrés centigrades.

Les essais ont été faits dans les mois les plus froids et l'on a éclairé et chauffé complètement un compartiment avec moins de  $\frac{3}{100}$  de mètre cube de gaz. La chaleur n'a pas été moindre de 11° centigrades, elle était plutôt entre 13 et 16°.

Pour empêcher le gel de l'eau dans la chaudière et dans les tuyaux lorsque les wagons ne sont pas employés, on ajoute un peu de glycérine.

Ce système a l'avantage de rendre le chauffage du wagon indépendant de la locomotive.

*Rédaction.*

(Extrait de la *Schweizerische Bauzeitung*, 30 avril 1887.)

#### LIGNE TÉLÉPHONIQUE SOUTERRAINE

Le numéro du 21 mai de la *Schweizerische Bauzeitung* donne quelques détails sur l'établissement récent d'une ligne souterraine de fils téléphoniques à Zurich.

Les bureaux de Rennweg et de la Kappelergasse sont réunis maintenant par 32 câbles souterrains contenant chacun 27 conducteurs renfermés tous ensemble dans un canal formé de deux fers zorès de 16 cm. de diamètre.

Chaque conducteur est préservé des courants d'induction par une enveloppe en plomb reliée à la terre. Ce tube en plomb est fabriqué sur le conducteur même, au moyen des machines inventées par l'ingénieur Borel de la fabrique de Cortaillod.

*Rédaction.*

#### JAUGE DES NAVIRES

Nous extrayons d'une note de l'ingénieur Thurninger, insérée aux Annales des Ponts et Chaussées de février 1887, les renseignements suivants sur le jaugeage des bateaux et des navires.

Les bateaux destinés à la navigation intérieure en France sont jaugés d'après le poids maximum du chargement. L'unité de mesure est le tonneau ou tonne de 1000 kilogrammes.

Les navires de mer sont jaugés d'après le volume des marchandises qu'ils peuvent embarquer et dans ce cas l'unité de jauge est le tonneau ou tonne de 100 pieds cubes anglais ou  $2^{m^3} 83$ . C'est le tonneau Moorsom adopté par l'Angleterre et la plupart des nations maritimes. On rencontre encore en France le tonneau Colbert ou tonneau d'encombrement, il a  $1^{m^3} 44$ .

L'auteur signale les graves inconvénients que présente l'emploi des mots tonne et tonneau pour désigner tantôt un chargement de 1000 kg, tantôt une capacité de  $2^{m^3} 83$  ou de  $1^{m^3} 44$  et indique les méthodes de mensuration usitées en divers pays et à diverses époques.

*Rédaction.*