Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Band: 27 (1898-1899)

Artikel: Funiculaires à contrepoids d'eau et régulateur de vitesse à force centrifuge

Autor: Ladame, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-88428

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: 05.02.2026

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

Séance du 19 janvier 1899

FUNICULAIRES A CONTREPOIDS D'EAU

et Régulateur de vitesse à force centrifuge

Application aux Funiculaires de Serrières et de l'Ecluse-Plan

PAR H. LADAME, INGÉNIEUR

Etant donné deux vagons, l'un descendant sur une pente quelconque (pl. I, fig. 1), et faisant monter par son poids un second vagon d'un poids donné, se trouvant sur une pente différente, il se produirait, si les vagons n'avaient pas de freins, un mouvement uniformément accéléré, pour lequel, d'une manière générale :

$$v = \varepsilon t \qquad s = \varepsilon \frac{t^2}{2} = \frac{v^2}{2\varepsilon}$$

$$\text{d'où} \quad \varepsilon = \frac{v^2}{2s} = \frac{T}{M} \quad \text{et} \quad Ts = \frac{Mv^2}{2}$$

Equations dans lesquelles :

- v est la vitesse acquise au bout de t secondes.
- s le chemin parcouru pendant ce temps.
- ε l'accélération.
- T la résultante des forces agissant sur les masses.
- M les masses en mouvement.
- Ts le travail produit par ces masses en passant de la vitesse 0 à la vitesse v.

Pour que la vitesse reste constante, il faut que $\varepsilon = 0$, c'est-à-dire que la résultante des forces agissant sur les masses soit nulle. C'est le résultat qu'on obtient au moyen des freins. Soit :

$F, F_1, \ldots F_n$	la force développée par les freins à différents moments, force agissant en sens inverse de la marche du vagon moteur.
P	le poids des vagons vides.
P'	le poids des voyageurs, admis à 75^{kg} par voyageur, petit bagage compris, ou 67^{kg} sans bagages, enfants compris.
Q	le poids, ou cube d'eau, nécessaire pour mettre les trains en mouvement et leur faire prendre une vitesse v après un parcours s.
$\alpha, \alpha'..$	l'inclinaison de la voie au-dessus du croisement.
$\beta, \beta'..$	l'inclinaison de la voie au-dessous du croisement.
$P + Q$	le poids du vagon moteur, descendant sans voyageurs.
$P + P'$	le poids du vagon montant, voyageurs compris.
$(2P + P' + Q)f$	la résistance au roulement des vagons, les cosinus d'α et de β différant fort peu de l'unité dans la plupart des cas.
$f = 0,005$	soit 5^{kg} par tonne, au moment du démarrage.
$f = 0,003$	soit 3^{kg} par tonne en pleine course.

C	la force nécessaire pour maintenir le câble en mouvement.
$p\,(h' - h'')$	la composante du poids du câble suivant la pente.[1]
p	le poids du câble par mètre courant.
$h' - h''$	la différence de niveau entre les voitures au moment considéré.
H	la différence de niveau entre les stations extrêmes.

Au moment de la rupture d'équilibre, avant le départ des trains, on a :

$$(P + Q)\sin\alpha = (P + P')\sin\beta + 0{,}005\,(2P + P' + Q) + C + pH + F \qquad 1$$

autrement dit : la pression que la roue dentée, commandée par le frein, exerce sur la crémaillère, doit être égale à la résultante T des forces agissant sur les masses, c'est-à-dire :

$$F = (P + Q)\sin\alpha - (P + P')\sin\beta - 0{,}005\,(2P + P' + Q) - C - pH \qquad 2$$

Desserrant le frein peu à peu, le train se met en mouvement, et sa marche s'accélère jusqu'à ce qu'elle atteigne la vitesse v après le parcours s. En ce moment, et tant que le vagon moteur se trouve au-dessus du croisement, on doit avoir, pour que la vitesse reste constante :

$$F_1 = (P + Q)\sin\alpha' - (P + P')\sin\beta' - 0{,}003\,(2P + P' + Q) - C - p\,(h' - h'') \qquad 3$$

[1] Voir *Bulletin*, tome XVI : Recherches sur la tension, le flottement et la compensation du poids des câbles.

Si P, P′ et Q sont exprimés en tonnes, la résistance totale de la voie :

$$K = 3(2P + P' + Q) + C \qquad 4$$

Cette résistance était en moyenne de 324kg à la fin de 1895 sur les funiculaires suisses, atteignant son maximum, 575kg, au Lauterbrunnen-Grütsch, et son minimum, 125kg, au Gütsch-Bahn.

Au croisement,

$$\alpha = \beta = \gamma \quad \text{et} \quad h' = h''$$

d'où

$$F_c = (Q - P')\sin\gamma - K \qquad 5$$

En dessous du croisement :

$$F_2 = (P + Q)\sin\beta' - (P + P')\sin\alpha' - K + p(h' - h'') \qquad 6$$

Au moment de l'arrivée du vagon moteur à la station inférieure :

$$F_n = (P + Q)\sin\beta - (P + P')\sin\alpha - K + pH + \frac{Mv^2}{2s} \qquad 7$$

Dans le cas où la pente est uniforme $\alpha = \beta = \gamma$ et

$$F_n = (Q - P')\sin\gamma - K + pH + \frac{Mv^2}{2s}$$

Compensation du poids du câble. — Dans le cas où le câble est continu, $p(h' - h'')$ est annulé; par contre, C double de valeur, le câble devant s'infléchir sur les deux voies et sur une seconde poulie placée à la station inférieure.

Valeur de P. — Le poids moyen des voitures est de 200kg environ par voyageur à transporter. Le poids maximum est de 8550^{kg} à Cossonay-Gare pour 32 voyageurs, soit 267^{kg} par voyageur. Le poids minimum, de 4800^{kg} à Lugano-Gare, pour 40 voyageurs, 24 assis et 16 debout, soit 120^{kg} par voyageur.

Valeur de C. — La force nécessaire pour maintenir le câble en mouvement, soit: pour vaincre sa raideur, l'infléchir sur la poulie principale et les poulies guides, vaincre son frottement sur les poulies dans le passage des courbes, le frottement des tourillons, etc., est proportionnelle au diamètre du câble, autrement dit à son poids. Mais la tension normale maximum ne devant pas dépasser dans la règle le $^1/_{10}$ de la charge de rupture T_r, on a $T_{max} = \frac{T_r}{10}$ d'où $C = \psi\, ^1/_{10} \frac{T_r}{p}\, p$

Or les essais faits au laboratoire de Zurich sur les câbles des 13 funiculaires en exploitation à la fin de 1895, ont donné comme moyenne:

$$^1/_{10} \frac{T_r}{p} = 1370^{kg} \quad \text{et} \quad p = 3^{kg}$$

Ajoutons que le maximum était $p = 5^{kg},8$ (Beatenberg), et le minimum $p = 1^{kg},8$ (Cossonay-Gare). En outre, on a constaté que les pertes provenant du câble, soit la résistance totale de la voie, frottement de roulement des vagons déduit, était en moyenne de 174^{kg}, d'où

$$\psi 1370 \times 3 = 174 \quad \text{soit} \quad \psi = 0{,}0423$$

On a donc, en moyenne:

$$C = 0{,}0423 \times 1370 \times p = 58\, p \qquad 8$$

Valeur de M. — Ayant $g = 9^m,81$, accélération due à la pesanteur

$$M = \frac{P+Q}{g} + \frac{P+P'}{g} + \frac{I}{R^2}$$

Equation dans laquelle :

R est le rayon de la poulie principale,
I le moment d'inertie des pièces en mouvement, soit : poulies, câble, galets, etc.
Si G est le poids de ces pièces,
m la masse de ces pièces, réduite en un point quelconque de la circonférence de la poulie principale,

on a

$$I = \frac{mR^2}{2} \quad \text{d'où} \quad \frac{I}{R^2} = \frac{m}{2} = \frac{1}{2}\frac{G}{g}$$

et

$$M = 0{,}102\,(2P + P' + Q + 0{,}5\,G) \qquad 9$$

Valeur de Q. — Si la force agissant sur les masses était constante, on aurait

$$F_1 = F \quad \text{et} \quad F = T = \frac{Mv^2}{2s}$$

mais cette force, P, P' et Q étant exprimés en tonnes, varie de $\Sigma - \{pH + 2^{kg}(2P + P' + Q)\}$ au départ, à $\Sigma + pH$ à l'arrivée, soit au total de $2(pH + 2P + P' + Q)$ lorsque la pente est uniforme. Si la pente n'est pas uniforme, cette force varie dans des limites encore plus considérables.

La force étant variable, on a donc après un parcours s :

$$\frac{F + F_1}{2} = \frac{Mv^2}{2s}$$

Remplaçant C par sa valeur dans les équations 2 et 3, et M par sa valeur dans l'équation ci-dessus, on obtiendra la valeur de Q en mètres cubes, P, P′ et G étant exprimés en tonnes, et p en kilogrammes.

En pleine charge. — Le vagon montant transportant le maximum de voyageurs qu'il peut contenir, l'autre vagon descendant à vide.

a. Si la pente n'est pas uniforme

$$Q^{m3} = \frac{1000(P+P')(\sin\beta+\sin\beta') - 1000P(\sin\alpha+\sin\alpha') + 8(2P+P')}{1000(\sin\alpha+\sin\alpha') - 8 - 102\frac{v^2}{s}} \\ \frac{+p(116+H+h'-h'') + 102(2P+P'+0{,}5G)\frac{v^2}{s}}{1000(\sin\alpha+\sin\alpha') - 8 - 102\frac{v^2}{s}} \qquad 10$$

b. Si la pente est uniforme

$$\alpha = \alpha' = \beta = \beta' = \gamma \quad \text{et} \quad h' - h'' = H - 2s\sin\gamma \qquad 11$$

d'où

$$Q^{m3} = \frac{2000P'\sin\gamma + 8(2P+P') + 2p(58+H-s\sin\gamma) + 102(2P+P'+0{,}5G)\frac{v^2}{s}}{2000\sin\gamma - 8 - 102\frac{v^2}{s}} \qquad 12$$

Marche à vide. — Dans ce cas $P' = 0$ et l'on a :

a. Si la pente n'est pas uniforme

$$Q^{m3} = \frac{P\left\{1000(\sin\beta+\sin\beta'-\sin\alpha-\sin\alpha') + 16 + 204\frac{v^2}{s}\right\}}{1000(\sin\alpha+\sin\alpha') - 8 - 102\frac{v^2}{s}} \\ \frac{+p(116+H+h'-h'') + 51\,G\frac{v^2}{s}}{1000(\sin\alpha+\sin\alpha') - 8 - 102\frac{v^2}{s}} \qquad 10'$$

b. Si la pente est uniforme

$$Q^{m^3} = \frac{P\left(16 + 204\frac{v^2}{s}\right) + 2p(58 + H - s\sin\gamma) + 51G\frac{v^2}{s}}{2000\sin\gamma - 8 - 102\frac{v^2}{s}} \qquad 12'$$

Valeur de p. — Le poids du câble par mètre courant varie suivant qu'il s'agit du transport des personnes ou du transport des marchandises, et suivant que la ligne a une pente uniforme ou que son tracé présente une suite de pentes différentes les unes des autres.

Pour le transport des personnes, on admet une sécurité de 10 comme suffisante[1], c'est-à-dire la charge normale maximum égale au $^1/_{10}$ de la charge de rupture.

Ayant

$$p = 0{,}0094\frac{T_{max}}{t_{max}}\ ^{2} \quad T_{max} = \frac{1}{10}T_r \quad \text{et} \quad \frac{1}{10}\frac{T_r}{p} = 1370$$

on a $\quad t_{max} = 12^{kg},9 \quad$ d'où $\quad p = 0{,}00073\,T_{max} \qquad 13$

Cette valeur de p serait suffisante, si la pente était uniforme, mais si le profil en long présente des parties concaves par suite de l'obligation de passer sous des routes, chemins de fer, ou simplement par suite de la configuration même du sol, le câble flotterait dès que la tension par millimètre carré dépasserait $t = 12^{kg},9$, c'est-à-dire au moindre à-coup, si les courbes de raccordement des pentes successives étaient calculées pour la traction normale maximum seulement.

[1] Le Département fédéral des chemins de fer a autorisé cependant des sécurités beaucoup plus faibles; ainsi, la sécurité au Bienne-Macolin est de 7,6; au Beatenberg-Bahn et au Territet-Glyon, de 7,7; au Lausanne-Ouchy, de 7,83.

[2] *Bulletin,* t. XVI, p. 62.

On préviendra le flottement du câble, à moins d'à-coups exceptionnels, soit en relevant le profil de la ligne sur la longueur du raccordement, soit en augmentant le poids du câble, soit en faisant l'un et l'autre à la fois.

1er cas. — Relèvement du profil en long de la ligne sans augmentation du poids du câble.

On relèvera le profil d'une façon suffisante en calculant la courbe de raccordement pour une traction majorée d'une quantité proportionnelle à la somme des différences des pentes, et inversement proportionnelle à la somme de ces pentes.

La position de cette courbe étant déterminée par l'inclinaison δ de la ligne passant par ses points de tangence, fig. 2, l'augmentation de traction

$$\varphi = \frac{(t_g\,\delta - t_g\,\gamma) + (t_g\,\alpha - t_g\,\gamma) + (t_g\,\alpha - t_g\,\delta)}{t_g\,\alpha + t_g\,\delta + t_g\,\gamma}$$

mais la courbe étant une parabole

$$t_g\,\delta = \frac{t_g\,\alpha + t_g\,\gamma}{2} \quad \text{d'où} \quad \varphi = 1{,}333\,\frac{t_g\,\alpha - t_g\,\gamma}{t_g\,\alpha + t_g\,\gamma}$$

T'_{max} étant la traction normale maximum majorée :

$$T'_{max} = (1 + \varphi)\,T_{max}$$

Dans ce cas, le raccordement des pentes sera calculé pour une tension :

$$t' = (1 + \varphi)\,12^{kg},9$$

et le poids du câble pour une tension

$$t = 12^{kg},9 \quad \text{d'où} \quad p = 0{,}00073\,T_{max}$$

mais

$$T_{max} = (P + Q)\sin\alpha - F$$

remplaçant F par sa valeur, formule 2, (P, P′ et Q étant exprimés en tonnes), on a :

$$T_{max} = (P + P')\,1000\sin\beta + 5\,(2P + P' + Q) + p\,(58 + H)$$

d'où

$$p = \frac{(P + P')\,1000\sin\beta + 5\,(2P + P' + Q)}{1312 - H} \qquad 13'$$

Ainsi, dans ce cas, le poids du câble se calcule par la même formule (13) que si la pente était uniforme.[1]

2me cas. — Augmentation du poids du câble sans relèvement du profil en long.

Si les conditions locales exigent que l'on maintienne la ligne le plus bas possible, on augmentera le poids du câble de façon que l'augmentation de traction soit la même que ci-dessus.

[1] Si le câble était vertical, on aurait

$$\sin\beta = 1 \quad H = L \quad \text{et} \quad 5\,(2P + P' + Q) = 0$$

puisqu'il n'y aurait plus de frottement sur rail.

Par suite

$$p = \frac{P + P'}{1312 - L}$$

Dans le cas où ce câble ne serait soumis qu'à son propre poids, on aurait

$$P + P' = 0 \quad \text{d'où} \quad L = 1312^{m}$$

ce qui correspond à sa « charge limite » admissible. Cette formule étant établie pour une tension égale au $^1/_{10}$ de la charge de rupture, une tension 10 fois plus forte provoquerait la rupture. En un mot, le câble romprait sous une charge égale à 13 120 fois son poids par mètre courant; pour $p = 4^{kg}$, par exemple, un câble en acier fondu de bonne fabrication romprait sous une charge de $4 \times 1312 = 5248^{kg}$, rond 52 tonnes.

Dans ce cas, le raccordement des pentes sera calculé pour une tension $t = 12^{kg},9$ et le poids du câble pour une tension

$$t'' = \frac{1}{1+\varphi}\, 12^{kg},9 \quad \text{d'où} \quad p = 0{,}00073\,(1+\varphi)\,T_{max}$$

Remplaçant T_{max} par sa valeur, on a :

$$p = \frac{(P+P')\,1000 \sin\beta + 5\,(2P+P'+Q)}{\dfrac{1312-58\varphi}{1+\varphi} - H} \qquad 13''$$

3me cas. — Relèvement du profil en long, et augmentation du poids du câble simultanément.

Si l'on ne peut relever la ligne qu'en partie, ne correspondant pas à la totalité de l'augmentation de traction nécessaire, le raccordement devant être calculé pour une tension

$$t_1' = \left(1 + \frac{\varphi}{n}\right) 12^{kg},9$$

on calculera le poids du câble pour une tension

$$t_1'' = \frac{1+\dfrac{\varphi}{n}}{1+\varphi}\, 12^{kg},9 \quad \text{d'où} \quad p = 0{,}00073\, \frac{1+\varphi}{1+\dfrac{\varphi}{n}}\, T_{max}$$

Remplaçant T_{max} par sa valeur, on a :

$$p = \frac{(P+P')\,1000 \sin\beta + 5\,(2P+P'+Q}{\dfrac{1312\,n + 1370\,\varphi - 58\,n\,\varphi}{n\,(1+\varphi)} - H} \qquad 13'''$$

Ayant deux équations (10 et 13) entre p et Q, il est dès lors facile de déterminer la valeur de ces deux quantités dans chaque cas particulier.

La section métallique du câble étant donnée par la relation

$$q = \frac{T_{max}}{t_1''}$$

la traction peut donc atteindre, au moment d'un à-coup,

$$T'_{mvx} = q\,t_1' = \frac{t_1'}{t_1''}\,T_{max}$$

sans que le câble soit soulevé au-dessus de ses poulies, puisque la ligne de raccordement est construite suivant la courbe que décrirait un câble librement suspendu par ses deux extrémités, soumis à la tension t_1'.

Nous avons admis $t = 12^{kg},9$ comme moyenne de la tension normale maximum, mais si l'on prenait $t \gtrless 12^{kg},9$ il suffirait de remplacer dans les équations ci-dessus le coefficient 0,00073 par $\dfrac{0{,}0094}{t}$.

La pente maximum des funiculaires existant en Suisse à la fin de 1895 était de 60 % (Lauterbrunnen-Grütsch), la pente minima de 10 % (Cossonay-Gare).

La longueur maximum était de 1695^m (Beatenberg), la longueur minimum de 106^m (Marzili).

La vitesse règlementaire maximum était de $2^m,07$ (Bienne-Macolin), la vitesse minimum de 1^m (Lauterbrunnen-Grütsch), la vitesse moyenne était de $1^m,30$.

Régulateurs à force centrifuge.

Soit, pl. I, fig. 3:

$d = 2r$ le diamètre du régulateur, surface de frottement,

$2R$ le diamètre de la poulie principale,

$\mathfrak{F}$ la résistance développée à la circonférence du régulateur,

F' la résistance correspondante développée à la circonférence de la poulie principale,

on a $$\mathfrak{F} r = F'R \tag{14}$$

mais $\mathfrak{F} = \mu S$; or $\mu = 0{,}30$ coefficient du frottement, métal sur métal,[1]

et $S = m\rho\omega^2$ force centrifuge produite par la rotation des secteurs du régulateur, équation dans laquelle:

m représente la masse des secteurs dont G' est le poids, d'où $m = 0{,}102\,G'$;

ρ est la distance du centre de gravité de ces secteurs à l'axe de rotation;

ω est la vitesse angulaire des masses en mouvement;

de plus $$\omega = \frac{v'}{\rho}$$

or $$v' = \frac{2\pi}{60}\rho n'' \quad \text{et} \quad v = \frac{2\pi}{60} R n$$

[1] Fonte sur fonte, surfaces mouillées d'eau, d'après Morin . 0,31
Métal sur métal, surf. mouillées d'eau, d'après Weissbach. 0,31
On emploie le même coefficient pour le calcul des freins à main, avec disques cannelés, placés sur les voitures.

v' étant la vitesse des centres de gravité des secteurs;

v étant la vitesse à la circonférence de la poulie principale, soit la vitesse à laquelle marchent les trains;

n'' étant le nombre de tours du régulateur par miuute;

n étant le nombre de tours de la poulie-principale par minute;

d'où
$$v' = \frac{\rho}{R}\frac{n''}{n} v$$

et
$$\mathfrak{F} = 0{,}0306\, G' \rho \left(\frac{n''}{n}\right)^2 \left(\frac{v}{R}\right)^2 \qquad 15$$

Remplaçant $\mathfrak{F}$ par sa valeur dans l'équation 14 et posant
$$\rho = r - x$$

désignant par x la distance du centre de gravité des secteurs à leur périphérie, distance que le constructeur peut toujours admettre à priori, parce qu'elle varie entre des limites assez étroites, et qu'on peut modifier facilement la forme et les dimensions des secteurs, on a :
$$0{,}0306\, G' \left(\frac{n''}{n}\right)^2 \left(\frac{v}{R}\right)^2 \left(r - x\right) r = F' R$$

Lorsque les secteurs sont cannelés, la force centrifuge nécessaire n'étant que les $^5/_7$ de ce qu'elle doit être lorsque la surface des secteurs est unie, on obtient le diamètre du régulateur par les formules suivantes :

Pour secteurs cannelés

$$d = x + \sqrt{x^2 + 93{,}6 \frac{F'R}{G'\left(\frac{n''}{n}\right)^2 \left(\frac{v}{R}\right)^2}} \qquad 16$$

Pour secteurs non cannelés

$$d = x + \sqrt{x^2 + 131 \frac{F'R}{G'\left(\frac{n''}{n}\right)^2 \left(\frac{v}{R}\right)^2}} \qquad 17$$

Considérations générales.

A. Funiculaires a pente uniforme.

Si *le câble est compensé,* c'est-à-dire s'il est continu, $p(h' - h'')$ est annulé, et la résistance à développer par les freins pour maintenir la vitesse uniforme est *constante* et égale, si P, P' et Q sont exprimés en tonnes, à :

$$F = (Q - P')\,1000 \sin\gamma - K \quad \text{(formules 3, 5, 6).}$$

Dans ce cas, le régulateur maintient la vitesse règlementaire sans le secours du frein à main, dès que cette vitesse est atteinte par les trains.

Le frein à main n'intervient que pour l'arrêt définitif, ou tout arrêt qui serait nécessaire pendant la durée de la course.

Si *le câble n'est pas compensé*, la résistance à développer par les freins n'est pas constante, et varie dans des limites parfois considérables.

Dans ce cas, c'est le frein à main qui règle la vitesse, le régulateur n'intervenant que pour réduire son action d'une quantité constante.

B. Funiculaires à pente non uniforme.

Si le profil en long de la ligne comporte une succession de pentes différentes, l'importance du frein à main s'accentue encore davantage, que le câble soit compensé ou non compensé.

Applications.

I. Plan incliné de la Gare de Serrières.

Je fus chargé, en 1890, de l'étude définitive de cette ligne, que j'avais projetée, et dont j'avais soumis les premiers plans aux intéressés en 1885. Elle a été ouverte à l'exploitation en juin 1892.

La pente est uniforme, 60 %, d'où $\sin\gamma = 0{,}5145$

La charge mobile élevée par course, comprenant 3 vagonnets de 800^{kg} $P' = 2400^{kg}$

Le poids du vagon transporteur, vide $P = 3500^{kg}$

Ce poids correspond à $\frac{3500 \times 75}{2400} = 109^{kg}$ par 75^{kg} transportés, ou à 146^{kg} par 100^{kg}, ensorte que ces vagons sont plus légers que ceux du Lugano-Gare, les plus légers connus en Suisse à cette époque.

La différence de niveau entre les stations extrêmes $H = 28^{m},20$

La longueur du parcours mesuré suivant la pente $\frac{H}{\sin\gamma} = 54^{m},80$

Le poids des poulies, câble, transmissions, soit poids des pièces en mouvement $G = 1200^{kg}$

Le poids du câble par mètre courant serait déterminé par la formule 13, si ce « plan incliné » était affecté au service des voyageurs, mais, ne transportant que des marchandises, on a admis 7,5 de sécurité au lieu de 10, ensorte que

$$p = 1^{kg},8 \quad \text{au lieu de} \quad 2^{kg},4.$$

Le cube d'eau correspondant à la charge normale pour une vitesse $v = 1^m$, marche actuelle, après un parcours $s = 5^m$, est donc suivant formule 12

$$Q^{m^3} = \frac{2469^{kg},6 + 75^{kg},2 + 301^{kg} + 204^{kg}}{1029 - 8 - 20,4} = 3^{m^3},047$$

pour « marche à vide » on aurait:

$$Q^{m^3} = \frac{198,8 + 301,1 + 6,12}{1000,6} = 0^{m^3},505$$ [1]

Pour les masses en mouvement, on a de l'équation 9

$$M = 1330,8.$$

Dans ces conditions, la résistance que les freins doivent neutraliser sur la poulie principale, dès que la vitesse atteint son maximum règlementaire, est, suivant formules 3, 4 et 11

$$F_1 = (Q - P')\,1000 \sin\gamma - K - p\,(H - 2s\sin\gamma)$$

ayant

$$K = 3^{kg}(2 \times 3^t,5 + 2^t,4 + 3^t,05) + 58 \times 1^{kg},8 = 141^{kg},74$$

[1] En réalité, le cube d'eau pour « marche à vide » est de 600 litres, Bulletin, t. XXI, p. 179, le câble s'enroulant, non sur une seule poulie, mais sur trois, et sa section étant complètement métallique (câble cloisonné), ce qui le rend moins flexible que le câble à six torons, avec âme en chanvre.

et $$p(H - 2s \sin\gamma) = 41^{kg},5$$

Si l'on remplace Q et P' par leurs valeurs en tonnes dans l'équation ci-dessus,

$$F_1 = 150^{kg}.$$

Pour le régulateur (pl. I, fig. 3), on a :

Diamètre de la circonférence de frottement $d = 0^m,650$

Le poids des secteurs étant de 21^{kg}, le poids des six secteurs $G' = 126^{kg}$

La distance du centre de gravité des secteurs à la surface de frottement $x = 0^m,07$

Le rapport de transmission

$$\frac{2292}{477} \times \frac{860}{344} = \frac{n''}{n} = 12$$

Le diamètre de la poulie principale $2R = 2^m,50$

La vitesse maximum admise $v = 1^m$

Les secteurs n'étant pas cannelés, nous déduirons de la formule 17 la résistance, qu'à cette vitesse, le régulateur développe sur la poulie principale.

On a

$$F' = \frac{(d-x)^2 - x^2}{131\,R} G' \left(\frac{n''}{n}\right)^2 \left(\frac{v}{R}\right)^2 = 23^{kg},6$$

Le tableau ci-après indique la résistance totale que doivent fournir les freins, celle que produit le régulateur et celle que doit développer le frein à main, au départ, et après un parcours de 5^m, pour maintenir la vitesse de 1^m jusqu'au moment de l'arrêt définitif (formules 2, 3, 4, 5, 6 et 7).

ACTION DES FREINS	Résistance totale	Parcours	Résistance du Régulat.	Résistance du Frein à main	v
	kg	m	kg	kg	m
$F = F_c - 2^{kg}(2 \times 3^t,5 + 2^t,4 + 3^t,047) - 1^{kg},8 \times 28^m,2$	115,85	0	0	115,85	0
$F_1 = F_c - 1^{kg},8(28^m,2 - 2 \times 5^m \times 0,5145)$	150,00	5	23,6	126,40	1
$F_c = (3^t,047 - 2^t,4)\,514,5 - 141^{kg},74$	191,14	27,4	23,6	167,54	1
$F_2 = F_c + 1^{kg},8\,(28^m,2 - 2 \times 5^m \times 0,5145)$	232,28	49,8	23,6	208,68	1
$F_n = F_c + 1^{kg},8 \times 28^m,2 + \frac{1331}{2 \times 5^m}$	374,62	54,8	0	374,62	0

A la vitesse $v = 1^m$ l'action du régulateur est donc à peu près nulle. Cela indique qu'il a été construit pour une vitesse beaucoup plus grande. En effet, de la formule 17 on a :

$$v = \sqrt{\frac{131\,F' \times 1^3,25}{126^{kg} \times 12^2\,(0^m,65 - 0^m,14)\,0^m,65}} = 0,206\,\sqrt{F'}$$

ensorte que pour

$$F' = F_1 = 150^{kg}, \qquad v = 2^m,52$$

Si l'on voulait rester dans les limites que j'avais fixées en 1889[1], il faudrait admettre $v = 2^m$. Il suffirait pour cela de remplacer les roues de 860^{mm} et 344^{mm} de diamètre par des roues de 926^{mm} et 278^{mm}, de façon que $\frac{n''}{n} = 16$. Dans ces conditions, la résistance développée par le régulateur sur la poulie principale serait

$$F' = 41,8 \times 4 = 167^{kg},2$$

La vitesse de 2^m pour un plan incliné aussi court que celui de la gare de Serrières, et qui, de plus, ne

[1] Bulletin, t. XVII, p. 54.

transporte que des marchandises, n'a rien d'exagéré, alors que le funiculaire de Bienne-Macolin, qui ne transporte que des voyageurs, pour ne citer que celui-là, est autorisé par le Départemont fédéral des chemins de fer à marcher à la vitesse de $2^m,07$.

En marchant à 2^m, *avec la même quantité d'eau,* soit $Q = 3^{m3},047$, le parcours nécessaire pour atteindre cette vitesse serait, de l'équation 12 :

$$s^2 + 140\,s = 2878 \quad \text{d'où} \quad s = 18^m,2$$

Remplaçant s par sa valeur dans l'équation 11, l'équation 3 donne

$$F_1 = 191^{kg},14 - 1^{kg},8\,(28^m,2 - 2 \times 18^m,2 \times 0,5145) = 174^{kg},67.$$

Pour l'arrêt à fin de course nous admettrons que le ralentissement s'effectue sur un parcours $s' = 10^m$.

Dans ces conditions, l'action des freins pour maintenir la vitesse constante se répartirait comme suit :

POSITION DU VAGON MOTEUR	Parcours	Action des freins	Résistance du Régulat.	Résistance du Frein à main	v
	m	kg	kg	kg	m
Station supérieure. — Au départ . . .	0	115,85	0	115,85	0
A $18^m,20$ de la station ci-dessus . . .	18,2	174,67	167,2	7,5	2
Au croisement	27,4	191,14	167,2	24	2
A 10^m avant d'arriver à la station infér.	44,8	233,00	167,2	56	2
Station inférieure. — A l'arrivée . . .	54,8	507,7	0	507,7	0

S'il s'agissait de *réduire la durée de la course au minimum,* en conservant la même vitesse $v = 2^m$, il suffirait d'augmenter la quantité d'eau. La capacité des caisses à eau étant de 3500 litres, si nous faisons $Q = 3^{m3},5$, on a, de l'équation 12

$$s^2 + 388,28\,s = 2974 \quad \text{d'où} \quad s = 7^m,50.$$

Dans ces conditions, la course se ferait en 36 secondes, au lieu de 70 secondes, et l'on aurait :

POSITION DU VAGON MOTEUR	Parcours	Action des freins	Résistance du Régulat.	Résistance du Frein à main	v
	m	kg	kg	kg	m
Station supérieure. — Au départ . . .	0	346,45	0	346,45	0
A 7^m,50 de la station ci-dessus . . .	7,5	386,35	167,2	219,2	2
Au croisement	27,4	422,85	167,2	255,7	2
A 10^m avant d'arriver à la station infér.	44,8	454,70	167,2	287,5	2
Station inférieure. — A l'arrivée . . .	54,8	739,50	0	739,50	0

C'est ce qui était prévu à l'origine, la vitesse moyenne ayant été fixée à

$$\frac{54,8}{36^s} = 1^m,50.$$[1]

Il ressort de la discussion ci-dessus que les régulateurs de vitesse à force centrifuge, installés à la station supérieure des funiculaires à contrepoids d'eau, réduisent simplement l'action du frein à main, ainsi que nous l'avons déjà dit. Si, pour une raison ou une autre, le conducteur lâchait son frein, le régulateur agissant seul, le train précipiterait sa marche, et si cela se produisait au départ, le train franchirait le croisement à la vitesse

$$v = 0,1546\sqrt{422,85} = 3^m,18$$

et arriverait à fin de course avec une vitesse

[1] Bulletin, t. XXI, p. 179.

$$v = 0{,}1546 \sqrt{473{,}25} = 3^{m}{,}40$$

Pour prévenir des accidents de ce genre, j'ai disposé à Serrières le frein à main de telle sorte qu'il arrête automatiquement le train dès que le conducteur abandonne son frein.

Particularités de ce plan incliné.

Le plan incliné de la gare de Serrières est le premier funiculaire construit en Suisse pour relier deux lignes de chemins de fer à des niveaux différents, construction qui exige l'abordage rigoureusement exact des vagons transbordeurs aux différentes stations. C'est le premier, en Suisse également, pour lequel on a employé un câble cloisonné. Ce câble, fourni par Felten et Guillaume, à Cologne, convient particulièrement pour ce genre d'installation.

Enfin, c'est le premier sur lequel ait été établie une station intermédiaire facultative avec arrêt automatique, et dont les vagons aient été construits avec plateforme mobile autour de leur axe vertical pour permettre de diriger les vagonnets qu'ils transportent sur des voies coupant la ligne principale sous un angle quelconque, pl. II.

II. Funiculaire Ecluse-Plan (Neuchâtel-Ville).

La pente de ce funiculaire (pl. I, fig. 6), projeté en 1887[1] et construit en 1890, n'est pas uniforme. Le tableau ci-après indique pour les points principaux :

[1] Projet d'une voie de communication économique et rapide entre la ville et les quartiers situés au-dessus, par Hri Ladame, ingénieur. Neuchâtel, imprimerie Wolfrath & Cie, 1887.

la cote sur mer, la pente, le sinus correspondant, et la différence de hauteur, $h'-h''$, entre les voitures au moment considéré.

POINTS CONSIDÉRÉS	Cote sur mer	Pente de la voie	Sinus	$h'-h''$
	m	%		m
Origine de la courbe de raccordement $tg\ \alpha$	554,132	37,0	0,3470	111,505
Station supérieure. — Le Plan.	552,127	36,6	0,3435	109,50
Station de la Côte	513,184	27,2	0,2625	30,62
Croisement . . . . $tg\ \gamma$	497,352	23,0	0,2242	0
Station de la Boine	482,561	25,68	0,2487	30,62
Station inférieure. — L'Ecluse. . . $tg\ \beta$	442,627	33,0	0,3134	109,50

Les voitures comprennent 32 places assises, mais le dimanche on transporte souvent 40 à 45 personnes par voyage. La charge maximum pour 40 personnes à 75^{kg} (45 pers. à 67^{kg}, enfants compris) $P' = 3000^{kg}$

Le poids des voitures vides $P = 7800^{kg}$

Le poids mort est donc de $\frac{7800^{kg}}{40} = 195^{kg}$ par voyageur, alors que nous avons vu que ce poids était en moyenne de 200^{kg} en Suisse, à la fin de 1895.

La différence de niveau entre les stations extrêmes $H = 109^m{,}50$

Le poids des poulies, câble, etc., en chiffres ronds $G = 6000^{kg}$

Ce funiculaire passant sous une ligne de chemin de fer, le Jura-Simplon, et sous quatre chemins publics, en desservant deux stations intermédiaires, comprend trois rampes successives de 33, 23 et 37 %, raccordées, les deux premières par un arc de cercle de 150^m de rayon, et les deux suivantes par un arc parabolique calculé de façon que le câble reste sur ses poulies lors même qu'il aurait à supporter les plus forts à-coup auxquels il peut être soumis.

Raccordement parabolique. — La station du Plan, pl. I, fig. 4, étant prise comme origine des coordonnées X′ Y′, et la courbe cherchée A B devant être considérée comme portion d'arc de la parabole décrite par un câble librement suspendu par ses deux extrémités supposées de niveau[1], son équation est :

$$y' = \frac{2h}{a} x' - \frac{h}{a^2} x'^2$$

Cette courbe devant passer par le point B, dont les coordonnées sont l' et d':

l' étant la longueur du relèvement du câble en projection horizontale, et

d' étant la différence de niveau entre les deux points de tangence, on a

$$\frac{h}{a^2} = \frac{l' \, t_g \alpha - d'}{l'^2} = \frac{t_g \alpha - t_g \gamma}{2 l'}$$

Dans le cas particulier

$$t_g \alpha = \frac{2h}{a} = 0{,}37 \quad \text{et} \quad t_g \gamma = 0{,}23$$

De plus, la station du Plan étant à la cote	$552^m,116$
et le point J, intersection des tangentes 23 % et 37 %, étant à la cote	$520^m,479$
différence	$31^m,637$

on a $\frac{l'}{2} t_g \alpha = 31^m,637$ d'où $l' = 171^m$

[1] Bulletin, t. XVI. *Recherches sur la tension, le flottement et la compensation du poids des câbles.*

par suite

$$\frac{h}{a^2}=\frac{0{,}37-0{,}23}{2\times 171}=0{,}0004094$$

La tension par millimètre carré de section métallique du câble décrivant la même courbe que le raccordement étant t_1' :

$$\frac{h}{a^2}=\frac{0{,}0047+0{,}00313\,t_g{}^2\,\alpha}{t_1'}\ [1]$$

de ces deux équations

$$t_1'=\frac{0{,}0047+0{,}00313\times 0^2{,}37}{0{,}0004094}=12^{\text{kg}}{,}528$$

J'ai admis $t_1'=13^{\text{kg}}{,}333$, ce qui relève la ligne autant que les circonstances locales le permettaient.

Dans ces conditions,

$$\frac{h}{a^2}=\frac{0{,}0047+0{,}00313\times 0^2{,}37}{13{,}333}=0{,}0003848$$

ce qui donne pour l'équation de la courbe cherchée

$$y=0{,}37\,x-0{,}0003848\,x^2 \qquad 18$$

La relation entre la longueur sur laquelle le câble se soulève et la tension par millimètre carré à laquelle il est soumis, est donnée par la formule

$$l=\frac{t_g\alpha-t_g\gamma}{2}\times\frac{t_1'}{0{,}0047+0{,}00313\,t_g{}^2\,\alpha}=13{,}643\,t_1'$$

Dans le cas particulier,

$$t_1'=13^{\text{kg}}{,}333$$

[1] Bull. Soc. sc, nat., t. XVI.

d'où $l = 13{,}643 \times 13{,}333 = 181^{m},91$ et $\frac{l}{2} t_g \alpha =$ $33^{m},653$

Mais le point J étant à la cote $520^{m},479$

le nouveau point de tangence que nous prendrons comme origine du nouvel axe des X se trouve à la cote $554^{m},132$

L'origine des coordonnées X′ Y′ se trouvant à la cote $552^{m},116$

L'axe des X se trouve relevé, fig. 5, de $y =$ $2^{m},016$

Par suite, l'axe des Y se trouve déplacé de

$$x = \frac{2{,}016}{0{,}37} = 5^{m},45\,;$$

mais, pour cette valeur de x, $y = 2^{m},005$, ensorte que la station du Plan est relevée de $2^{m},016 - 2^{m},005 = 0^{m},011$ et se trouve définitivement à la cote

$$552^{m},116 + 0^{m},011 = 552^{m},127$$

Le parcours de la station du Plan à un point quelconque du raccordement parabolique étant s, si l'on désigne par D′ le développement de l'arc compris entre l'origine des coordonnées et cette station, le parcours, de l'origine des coordonnées au point considéré, est :

$$D = s + D'$$

mais

$$\frac{6x + a\,t_g^2\alpha - 6D'}{a - x} = \left(t_g\alpha - \frac{2h}{a^2}x\right)^2$$

Dans le cas particulier

$$\frac{h}{a^2} = 0{,}0003848 \quad \text{et} \quad t_g\alpha = 0{,}37$$

d'où $$a=\frac{0{,}37}{2\times 0{,}0003848}=480^{\mathrm{m}}{,}775$$

pour $x=5^{\mathrm{m}}{,}45$

$$D'=\frac{6\times 5{,}45+480{,}775\times 0^2{,}37-(480{,}775-5{,}45)(0{,}37-0{,}00077\times 5{,}45)^2}{6}=5^{\mathrm{m}}{,}82$$

et par suite

$$D=s+5^{\mathrm{m}}{,}82 \qquad 19$$

Pour n'importe quel parcours, s étant donné, on connaît D, et l'on pourra déterminer l'abscisse du point de la ligne où se trouve le vagon moteur par la formule :[1]

$$x=480{,}775-171{,}727\left\{\begin{array}{l}\sqrt[3]{\sqrt{1500534+(491{,}7-D)^2}+(491{,}7-D)}\\ -\sqrt[3]{\sqrt{1500534+(491{,}7-D)^2}-(491{,}7-D)}\end{array}\right\} \qquad 20$$

connaissant x, l'inclinaison de la voie, au point considéré, est donnée par l'équation :

$$t_g\,\alpha'=t_g\,\alpha-\frac{2h}{a^2}x=0{,}37-0{,}0007696\,x \qquad 21$$

d'où

$$\sin\alpha'=\frac{t_g\,\alpha'}{\sqrt{1+t_g^2\,\alpha'}}$$

valeur que l'on trouve sans calculs dans les tables de «Gaunin», Paris, Dunod édit., quai des Augustins, 49.

Calcul de p et de Q. — La courbe raccordant les pentes de 23 et 37 $^0/_0$ entre la Boine et le Plan n'ayant

[1] Voir formule générale, Bulletin, t. XVI. *Recherches sur la tension, le flottement et la compensation du poids des câbles.*

pu être relevée que d'une quantité relativement faible, correspondant à la tension $t_1' = 13^{kg},333$, le poids du câble a dû être augmenté de la quantité nécessaire pour prévenir son flottement sur ce parcours.

Ayant

$$\varphi = 1,333 \frac{0,37 - 0,23}{0,37 + 0,23} = 0,31$$

et

$$t_1' = \left(1 + \frac{0,31}{n}\right) 12^{kg},9 = 13^{kg},333$$

on a $$n = 9,235$$

remplaçant n par sa valeur dans l'équation 13'''

$$p = \frac{(P + P') 1000 \sin\beta + 5 (2P + P' + Q)}{1023 - H}$$

connaissant P, P', $\sin\beta$ et H, on a

$$p = \frac{695,54 + Q}{182,7}$$

En outre, la vitesse devant atteindre $v = 2^m$ après un parcours $s = 10^m$ au départ du Plan, on a :

$$D = 15^m,82 \quad x = 14^m,88 \quad y = 5^m,42 \quad \sin\alpha' = 0,3375$$

correspondant à une pente de 35,85 % et

$$h' - h'' = 102^m,95$$

Remplaçant $\sin\alpha$, $\sin\alpha'$, H et $h' - h''$ par leurs valeurs dans l'équation 10, et ayant

$$\sin\beta' = \sin\beta = 0,3134,$$

on a:
$$Q = \frac{7{,}49 + p}{1{,}935}$$

De ces deux équations on tire

$$p = 3^{kg},84 \quad \text{et} \quad Q = 5^{m^3},85$$ [1]

Il suit de là que la traction normale maximum pour 40 voyageurs (P, P′ et Q étant exprimés en tonnes) est:

$$T_{max} = 10^{t},8 \times 313{,}4 + 5^{kg} \times 24^{t},6 + 3^{kg},84 \times 167{,}5 = 4150^{kg}$$

De plus
$$t_1'' = \frac{1 + \frac{\varphi}{n}}{1 + \varphi}\, t = 10^{kg},178$$

d'où la section métallique du câble

$$q = \frac{4150}{10{,}178} = 408^{mm^2}$$ [2]

[1] Le parcours, pour atteindre la vitesse règlementaire, restant le même, on aurait de l'équation 10 en fonction de P′, v et p

$$Q = \frac{(62{,}2 + v^2)\,P' + 18{,}59\,v^2 + 32{,}2\,p - 31{,}85}{66{,}3 - v^2}$$

Pour $p = 4^{kg}$ et $P' = 3^{t}$	(45 voyag.)	$v = 2^{m}$	$s = 10^{m}$	on a	$Q = 5^{m^3},94$
»		$v = 1^{m}$	»		$Q = 4^{m^3},67$
$P' = 2^{t},4$	(32 voyag.)	$v = 2^{m}$	»		$Q = 5^{m^3},30$
»		$v = 1^{m}$	»		$Q = 4^{m^3},09$
$P' = 0^{t}$	(marche à vide)	$v = 2^{m}$	»		$Q = 2^{m^3},75$
»		$v = 1^{m}$	»		$Q = 1^{m^3}.77$

[2] Le câble livré par Felten et Guillaume avait une section métallique de 409^{mm^2}, d'après le procès-verbal des essais faits au laboratoire fédéral de Zurich, le 21 février 1890, sur envoi d'échantillon du 28 novembre 1889, et ce câble pesait $3^{kg},97$ par mètre courant. Comme sa section était à peu près exactement celle que nous donne le calcul ci-dessus, il s'ensuivrait que le poids des câbles neufs est d'environ 3% plus grand que celui du même câble après quelques mois de service, par suite d'étirage, etc., soit $0^{kg},0097$ au lieu de $0^{kg},0094$ par centimètre cube comme nous l'avons admis.

La traction peut donc atteindre au moment d'un à-coup : $T'_{max} = 408 \times 13^{kg},333 = 5440^{kg}$

sans que le câble soit soulevé au-dessus de ses poulies, la voie ayant été construite suivant la courbe que décrirait un câble librement suspendu, soumis à cette tension $t_1' = 13^{kg},333$.

Le tableau ci-dessous indique les résultats que l'on aurait obtenu pour l'Ecluse-Plan dans les différents cas pouvant se présenter.

1re colonne. Relèvement du profil de raccordement, sans augmentation du poids du câble.

2me colonne. Relèvement du profil et augmentation du poids du câble simultanément.

3me colonne. Augmentation du poids du câble, sans relèvement du profil.

$tg\,\alpha = 0,37$ $tg\,\gamma = 0,23$ $\varphi = 0,31$	I	II	III
Tension admise pour le calcul de la courbe de raccordement . .	kg $t' = 16,9$	kg $t_1' = 13,333$	kg $t = 12,9$
Tension correspondante pr le câble	$t = 12,9$	$t_1'' = 10,178$	$t'' = 9,85$
Poids du câble par mètre courant, p	3,43	3,84	4,00
Cube d'eau donnant une vitesse de 2^m après un parcours de 10^m, Q	$5^{m^3},73$	$5^{m^3},85$	$6^{m^3},03$
Traction correspondant au poids de la voiture partant de l'Ecluse avec 40 voyageurs . . $(P + P') \sin \beta$	kg 3385	kg 3385	kg 3385
Effort nécessaire pour vaincre au départ le poids du câble et les frottements $5(2P + P' + Q) + p(58 + H)$	696	765	793
Effort total de traction	4081	4150	4178
Traction majorée	5345	5440	5470
Différence, soit augmentation que peut éprouver la traction sans que le câble soit soulevé au-dessus de ses poulies	1264	1290	1292

Observations. — Le poids du câble par mètre courant et le profil en long de la ligne établis comme nous venons de l'indiquer, on n'a jamais constaté le moindre flottement du câble, bien que celui-ci, à l'intersection des tangentes, se trouve à $4^{m},80$ au-dessous de la ligne passant par les points A et C, pl. I, fig. 6. Il n'en a pas été de même en 1894, lors de son renouvellement qui eut lieu à cette époque, bien qu'il fût loin d'être à bout d'usure. L'administration du funiculaire Ecluse-Plan se borna, paraît-il, à indiquer au constructeur la plus grande pente de la ligne et le poids maximum à transporter, ensorte que le nouveau câble pesant $3^{kg},47$ par mètre courant, il fut impossible de l'utiliser. A peine en place il se souleva, quitta ses poulies, et vint frotter contre les murs qui limitent la voie de chaque côté; il fallut immédiatement le remplacer par l'ancien qu'on venait d'enlever et attendre que le fabricant pût fournir un câble du même poids que celui que j'avais fait poser lors de l'établissement de la ligne. Pour éviter tout mécompte, il envoya un câble pesant $4^{kg},20$ au lieu de $3^{kg},90$ qui aurait été suffisant, en sorte que non seulement ce nouveau câble ne se lève pas, mais s'incruste dans les poulies et les use rapidement.

C'est également pour avoir méconnu les principes que nous venons d'exposer que, lors des essais du funiculaire de Territet-Glion, en 1883, on eut la désagréable surprise de voir le câble se soulever de plusieurs mètres, et que l'on fut contraint, pour le maintenir en place, de construire un bras mobile avec mécanisme compliqué, en attendant que l'on eût corrigé le profil en long de cette ligne, ce qui n'eut lieu qu'en 1891, après l'achèvement de l'Ecluse-

Plan, et exigea la reconstruction complète de 230^m de voie.

Calcul de M. — Ayant

$$2P = 15^t,6 \quad P' = 3^t \quad Q = 6^t \quad {}^1/_2 G = 3^t$$

on a, de l'équation 9, pour les masses en mouvement

$$M = 102\,(15,6 + 3 + 6 + 3) = 2815$$

Action des freins. — Avant le départ des trains, dès que le conducteur a pris la quantité d'eau nécessaire pour la course, la pression F que la denture du frein du vagon moteur exerce sur la crémaillère pour maintenir l'équilibre est donnée par la formule 2. A l'Ecluse-Plan, le câble posé lors de la construction de la ligne pesant $p = 3^{kg},97$ par mètre courant, soit 4^{kg} en nombre rond, on avait

$$Q = 5^{m3},94, \text{ soit } 6^{m3}, \quad P + Q = 13^t,8 \quad P + P' = 10^t,8$$
$$\sin\alpha = 0,3435 \quad \sin\beta = 0,3134 \quad H = 109^m,50$$
$$C = 58\,p = 232^{kg}$$

$$\text{d'où } F = 13^t,8 \times 343,5 - 10^t,8 \times 313,4 - 5^{kg} \times 24^t,6 - 232^{kg} - 4^{kg} \times 109^m,5 = 563^{gk} \quad \text{(Pl. I, fig. 7)}$$

Desserrant davantage le frein, le train se met en marche, et sa vitesse augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne la limite règlementaire $v = 2^m$.

La force agissant sur les masses étant variable, le parcours que le train doit franchir pour atteindre cette vitesse est :

$$s = \frac{Mv^2}{F + F_1}$$

Mais la pente de la ligne n'étant pas uniforme, F_1 est $\varphi(\sin\alpha_1', \sin\beta')$ et par suite $\psi(s)$. Dans ces conditions, la valeur de s devient très difficile à déterminer directement, et l'on arrivera plus rapidement au but qu'on se propose, en procédant par approximations successives. Soit :

$s = 10^m$, de l'éq. 19 on a $D = 15^m,82$
» 20 » $x = 14^m,88$
» 21 » $t_g\alpha' = 0,3585$ et par suite $\sin\alpha' = 0,3375$
» 18 » $y = 5^m,42$

$h' = 111^m,505 - y = 106^m,10$ $h'' = 10^m \sin\beta = 3^m,10$ et $h' - h'' = 103^m$

Au moment du démarrage, nous avons admis 5^{kg} par tonne pour résistance au mouvement; mais, en marche, cette résistance n'est plus que de 3^{kg}, et la résistance totale de la voie :

$$K = 3^{kg}(2P + P' + Q) + 58p = 306^{kg}$$

Remplaçant $P + Q$, $\sin\alpha'$... par leurs valeurs dans l'équation 3, on a :

$$F_1 = 13^t,8 \times 337,5 - 10^t,8 \times 313,14 - 306^{kg} - 4^{kg} \times 103^m = 555^{kg}$$

d'où $$v = \sqrt{\frac{563^{kg} + 555^{kg}}{2815} 10^m} = 1^m,99$$

Cette première approximation est suffisante, et l'on atteint la vitesse de 2^m à 10^m du Plan.

A 5^m plus loin,

$s = 15^m$ d'où $D = 20^m,82$
$x = 19^m,688$
$t_g\alpha' = 0,3548$ et $\sin\alpha' = 0,3344$
$y = 7^m,136$

$h' = 104^m,37$ $h'' = 4^m,70$ et $h' - h'' = 99^m,67$ d'où

$$F_1' = 13^t,8 \times 334,4 - 10^t,8 \times 313,4 - 306^{kg} - 4^{kg} \times 99^m,67 = 525^{kg},3$$

La pente sur laquelle se trouve le vagon moteur diminuant de plus en plus, l'action des freins devient de plus en plus faible tant que la rampe sur laquelle se trouve le vagon montant reste constante.

A $99^m,90$ du Plan, l'action des freins devient nulle, c'est-à-dire qu'ils doivent être complètement desserrés pour que la vitesse $v = 2^m$ se maintienne.

En ce point $D = 105^m,72$

$x = 100^m,228$

$t_g \alpha' = 0,2929$ et $\sin \alpha' = 0,281054$

$y = 33^m,219$

$h' = 78^m,286$ $h'' = 31^m,309$ et $h' - h'' = 46^m,98$ d'où

$$F_1'' = 13^t,8 \times 281,05 - 10^t,8 \times 313,4 - 306^{kg} - 4^{kg} \times 46^m,9 = 0$$

A partir de ce point, la valeur de F_1 est négative et atteint son minimum à $115^m,365$ du Plan, soit au moment où la roue d'avant du vagon montant quitte la rampe de 33 $^0/_0$ près de la Boine, pour s'engager sur le raccordement des rampes de 33 et 23 $^0/_0$

En ce point $D = 121^m,185$

$x = 115^m,082$

$t_g \alpha' = 0,2810$ et $\sin \alpha' = 0,2709$

$y = 37^m,484$

$h' = 74^m,02$ $h'' = 36^m,15$ $h' - h'' = 37^m,87$

d'où la résistance que le frein devrait développer :

$$F_1''' = 13^t,8 \times 270,9 - 10^t,8 \times 313,14 - 306^{kg} - 4^{kg} \times 37^m,9 = -104^{kg}$$

A partir de ce point, les valeurs négatives deviennent de plus en plus faibles [1], et, à $120^m,25$ du Plan, l'action des freins est de nouveau égale à 0.

[1] Il suffirait d'augmenter un peu le cube d'eau pour que l'action des freins ne soit négative en aucun point du parcours.

En effet, ayant

$D = 126^m,07 \quad x = 119^m,788 \quad y = 38^m,8 \quad h' - h'' = 35^m,06$

la pente de la ligne est de 27,8 %, d'où $\sin \alpha' = 0,26767$, et

$$F_1^{IV} = 13^t,8 \times 267,7 - 10^t,8 \times 300,7 - 306^{kg} - 4^{kg} \times 35^m,1 = 0$$

Mais l'action des freins ne peut être négative, ensorte que la force vive, et par suite la vitesse, diminuent sur ce parcours. Soit v_1 la vitesse correspondant au minimum négatif de l'action des freins, ayant, pl. I, fig. 7 :

$$-\frac{104^{kg}}{2} = \frac{M(v_1^2 - 2^{m2})}{2 \times 15^m,465} \quad \text{on a} \quad v_1 = 1^m,852$$

de même si v_2 est la vitesse des masses en mouvement au moment où le vagon moteur se trouve à $120^m,25$ du Plan, soit au point où l'action des freins cesse d'être négative, on a :

$$-\frac{104^{kg}}{2} = \frac{M(v_2^2 - 1^{m2},85)}{2 \times 4^m,885} \quad \text{d'où} \quad v_2 = 1^m,80$$

A partir de ce point, la vitesse croîtrait rapidement si l'on ne devait pas s'arrêter à la station de la Côte. Pour assurer l'arrêt à cette station, la distance restant à parcourir étant de $8^m,22$, le frein doit exercer en ce point, sur la crémaillère, une pression :

$$F_n = 13^t,8 \times 262,5 - 10^t,8 \times 248,7 - 306^{kg} - 4^{kg} \times 30^m,6 + \frac{2815 \times 3,24}{2 \times 8^m,22} = 1063^{kg}$$

Station de la Côte. — Equilibre au départ :

$$F = 13^t,8 \times 262,5 - 10^t,8 \times 248,7 - 5^{kg} \times 24^t,6 - 232^{kg} - 4^{kg} \times 30^m,6 = 459^{kg}$$

après un parcours de 10^m, soit à $138^m,47$ du Plan,

$$F_1 = 13^t{,}8 \times 255{,}5 - 10^t{,}8 \times 224{,}2 - 306^{kg} - 4^{kg} \times 25^m{,}7 = 697^{kg}$$

la vitesse en ce point serait donc:

$$v = \sqrt{\frac{459 + 697}{2815} 10} = 2^m{,}02$$

Cette première approximation peut être considérée comme suffisante, et nous pouvons admettre que le train a repris sa vitesse normale lorsque le vagon moteur est à 10^m en aval de cette station.

A 15^m de la Côte, soit à $143^m{,}47$ du Plan

$\sin\alpha' = 0{,}252145$, $\sin\beta' = 0{,}22415$ et $h' - h'' = 23^m{,}33$ d'où

$$F_1' = 13^t{,}8 \times 252{,}15 - 10^t{,}8 \times 224{,}15 - 306^{kg} - 4^{kg} \times 23^m{,}3 = 660^{kg}$$

Croisement. — Au moment où les vagons se croisent, la résistance développée par les freins pour maintenir la vitesse uniforme:

$$F_c = (13^t{,}8 - 10^t{,}8)\,224{,}15 - 306^{kg} = 366^{kg}$$

A 250^m du Plan, soit à 10^m avant d'arriver à la Boine, la résistance développée par le frein au moment où le conducteur s'apprête à ralentir:

$$F_2 = 13^t{,}8 \times 224{,}15 - 10^t{,}8 \times 255{,}52 - 306^{kg} + 4^{kg} \times 25^m{,}73 = 130^{kg}$$

Au moment de l'arrêt à la Boine

$$F_n = 13^t{,}8 \times 248{,}7 - 10^t{,}8 \times 262{,}5 - 306^{kg} + 4^{kg} \times 30^m{,}6 + \frac{2815 \times 4}{2 \times 10} = 976^{kg}$$

Station de la Boine. — Equilibre au départ:

$$F = 13^t{,}8 \times 248{,}7 - 10^t{,}8 \times 262{,}5 - 5^{kg} \times 24^t{,}6 - 232^{kg} + 4^{kg} \times 30^m{,}6 = 364^{kg}$$

Après un parcours de 10^m, soit à 270^m du Plan

$$F_2 = 13^t{,}8 \times 308{,}3 - 10^t{,}8 \times 268{,}9 - 306^{kg} + 4^{kg} \times 36^m{,}1 = 1189^{kg}$$

ensorte que la vitesse acquise par le train serait en ce moment :

$$v = \sqrt{\frac{364 + 1189}{2815} 10} = 2^m{,}35$$

la vitesse dépassant 2^m, le parcours admis est donc trop considérable. Comme seconde approxlmation, nous prendrons $s = 8^m$. Or, pour ce point

$$F_2 = 13^t{,}8 \times 299{,}5 - 10^t{,}8 \times 367{,}5 - 306^{kg} + 4^{kg} \times 34^m{,}93 = 1077^{kg}$$

d'où $$v = \sqrt{\frac{364 + 1077}{2815} 8} = 2^m{,}02$$

approximation pouvant être considérée comme suffisante.

Après un parcours de 15^m, soit à 275^m du Plan, point où le vagon descendant se trouve au sommet de la pente de 33 $^0/_0$

$$F_2' = 13^t{,}8 \times 313{,}4 - 10^t{,}8 \times 273 - 306^{kg} + 4^{kg} \times 39^m{,}5 = 1229^{kg}$$

A 10^m avant d'arriver à l'Ecluse, la résistance développée par les freins :

$$F_2'' = 13^t{,}8 \times 313{,}4 - 10^t{,}8 \times 337{,}5 - 306^{kg} + 4^{kg} \times 103^m = 786^{kg}$$

Au moment de l'arrêt à l'Ecluse

$$F_n = 13^t{,}8 \times 313{,}4 - 10^t{,}8 \times 343{,}5 - 306^{kg} + 4^{kg} \times 109^m{,}5 + \frac{2815 \times 4}{2 \times 10^m} = 1310^{kg}$$

Résumé.

Charge maximum: 3000kg. — Cube d'eau maximum: 6^{m3}.
Vitesse règlementaire: 2^m.

POSITION DU VAGON MOTEUR	Distance à partir du Plan	Action des freins	v
Station du Plan.	m	kg	m
Equilibre au départ	0	563	0
A 10^m de la station du Plan	10	555	2
A 15^m de la station du Plan	15	525	2
A 28^m,57 avant d'arriver à la station de la Côte	99,9	0	2
A 13^m,105 avant d'arriver à la station de la Côte	115,365	-104	1,85
A 8^m,22 avant d'arriver à la station de la Côte	120,25	0	1,80
Station de la Côte.			
Au moment de l'arrêt	128,47	1063	0
Equilibre au départ	128,47	459	0
A 10^m de la station de la Côte	138,5	697	2
A 15^m de la station de la Côte	143,5	660	2
Croisement	194,25	366	2
A 10^m avant d'arriver à la station de la Boine	250	130	2
Station de la Boine.			
Au moment de l'arrêt	260	976	0
Equilibre au départ	260	364	0
A 8^m de la station de la Boine	268	1077	2
A 15^m de la station de la Boine	275	1229	2
A 10^m avant d'arriver à l'Ecluse.	378,5	786	2
Station de l'Ecluse.			
Au moment de l'arrêt	388,5	1310	0

Il ressort du tableau ci-dessus que, dans les conditions les plus défavorables, lorsqu'il y a surcharge, et qu'au lieu de 32 voyageurs, nombre règlementaire, le vagon moteur descendant à vide fait remonter à la vitesse de 2^m le second vagon avec 45 personnes, enfants compris, l'action des freins est nulle sur une vingtaine de mètres avant d'arriver à la station de la station de la Côte, pl. I, fig. 7.

Il en est de même, mais dans de plus faibles proportions, à mesure que l'on approche des stations de la Boine et de l'Ecluse. Le profil en long de cette ligne présente donc l'avantage de réduire automatiquement la vitesse des trains à mesure que le vagon moteur approche des différentes stations, de réduire par suite l'action des freins, et de faciliter la manœuvre pour obtenir l'arrêt.

Il ressort également du tableau ci-dessus qu'on ne pourrait établir un régulateur à force centrifuge au Plan sans graves inconvénients. C'est ce qu'on a pu constater lors des premiers essais qui furent faits avant l'ouverture de la ligne. Les entrepreneurs auxquels le Conseil d'administration avait remis la construction de ce funiculaire à forfait avaient fait poser un régulateur au Plan, contrairement à ce que stipulait le cahier des charges du 13 décembre 1888; or, non seulement ce régulateur ne réglait rien du tout, mais il entravait la marche des trains et faisait un tel bruit qu'on fut obligé de le supprimer. Il fut vendu comme vieux fer peu après. Le régulateur du Plan mis de côté, l'Administration fit placer des régulateurs sur les voitures, comme je l'avais prescrit précédemment, mais le choix de ces appareils ne fut pas heureux. Non seulement ils opposent une résistance sensible au mouvement des trains, ce qui entraîne l'augmentation du cube d'eau qui, sans cela, suffirait pour la traction, mais ils sont disposés de façon qu'ils provoquent un brusque arrêt dès que la vitesse dépasse la limite prescrite, ce qui a pour effet de rendre très difficile la conduite des trains, d'effrayer les voyageurs, et de faire perdre beaucoup de temps pour relever les contrepoids et remettre les voitures en marche chaque fois que se produisent ces arrêts subits.

On ne peut donc sans inconvénient adopter n'importe quel régulateur à force centrifuge sur les funiculaires à contrepoids d'eau. Une des meilleures installations que l'on connaisse actuellement est due à M. Pauli, ingénieur du contrôle fédéral des chemins de fer, à Berne. Dans ce dispositif (pl. III) le régulateur à force centrifuge placé sur les voitures actionne le frein à main, sans toutefois faire tourner la manivelle qui le commande. A mesure que la vitesse augmente, ce frein se serre peu à peu, de façon que l'arrêt se fait sans secousses et assez lentement pour que le conducteur puisse intervenir et empêcher l'arrêt complet s'il y a lieu. Il y parvient en tournant simplement la manivelle de ce frein en sens inverse de celui dans lequel le régulateur tend à le faire marcher.

On peut donc suspendre l'action de ce régulateur à volonté et par suite supprimer la résistance qu'il pourrait opposer au mouvement des trains à un moment donné.

Ce système simplifie en outre le mécanisme des voitures, en ce sens qu'il remplace très avantageusement le frein automatique qui ne doit fonctionner qu'en cas de rupture du câble et permet dès lors de le supprimer. Il est d'une grande simplicité et est employé sur les funiculaires de Bienne-Macolin, du Gütsch et de Fribourg; il devrait être adopté sur tous les funiculaires et les chemins de fer de montagne.

Particularités de l'Ecluse-Plan.

Voie croisée. — Ce funiculaire est à deux voies complètement indépendantes l'une de l'autre, et cependant les surfaces des emprises, le cube des terrassements et celui des maçonneries n'ont pas été plus considérables que si la ligne avait été à une seule voie. J'ai obtenu ce résultat en entrecroisant les voies de façon que le rail extérieur de la voie de droite n'est séparé du rail extérieur de la voie de gauche que par la largeur de la crémaillère de cette voie, soit de $0^m,28$, pl. IV, fig. 1, et en déplaçant les caisses des voitures de la moitié de cette distance, soit de $0^m,14$, l'une à droite, l'autre à gauche de l'axe de leurs bâtis, pl. IV, fig. 2. Les voitures passent dès lors dans le même gabarit, ensorte qu'elles abordent le quai des stations comme si elles se trouvaient sur une seule et même voie, et, par suite, la largeur des tunnels et des tranchées a pu être réduite à $3^m,40$, bien que les voitures aient $2^m,55$ de large. Ce type de voie réalise donc tous les avantages de la « voie unique » sans avoir les inconvénients que cette voie présente pour le service des voyageurs.

Traction diagonale. — Pour ne couper aucun rail, le câble a été placé en dehors des voies, ensorte que la traction se fait latéralement. Il s'ensuit un coinçage plus considérable que si la crémaillère se trouvait sur l'axe de la voie, et le câble à $0^m,30$ de cet axe, comme cela se voit généralement. A l'Ecluse-Plan, pl. IV, fig. 3, on a :

Excentricité du câble		$a = 0^m,68$
» de la crémaillère		$b = 0^m,36$
Distance des essieux		$c = 6^m$
Composante suivant la pente	vagon montant	$(P + P') \sin \beta$
	» descendant	$(P + Q) \sin \alpha$
Pression du frein sur la crémaillère		F

Pression latérale des roues contre le rail:

Vagon montant $$R = \frac{(P + P') \sin \beta}{c} a$$

Vagon descendant $$R' = \frac{\{(P + Q) \sin \alpha - F\} a + F b}{c}$$

Le coefficient de frottement fer sur fer étant $f = 0,14$, d'après Rennie, lorsque la pression latérale ne dépasse pas 9^{kg} par centimètre carré, la résistance à la traction provenant du coinçage des vagons est:

$$S = 0,28 \frac{\{(P + Q) \sin \alpha + (P + P') \sin \beta\} a - F(a - b)}{c}$$

A 10^m en aval du Plan

$\sin\alpha = 0,3375$ $\quad \sin\beta = 0,3314$ $\quad S = 274^{kg}$

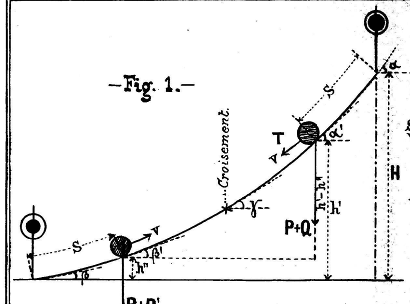
Au croisement $\sin\alpha = \sin\beta = 0,2242$ $\quad S = 170^{kg}$

A 10^m en amont de l'Ecluse

$\sin\alpha = 0,3134$ $\quad \sin\beta = 0,3375$ $\quad S = 241^{kg}$

Cette résistance, variable aux différents points de la ligne, doit être déduite de l'action des freins, ensorte que la traction diagonale tend à diminuer l'usure de la crémaillère, pièce coûteuse et difficile à remplacer, sans augmenter l'usure des rails d'une manière appréciable, ce qui a été constaté par l'inspectorat

-Fig. 1.-



Coupe a-b.

t' ... Raccordement. Tension majorée par rapport à celle du câble, t.

t'1 ... Idem ...... Tension admise, correspondant à celle du câble ... t1.

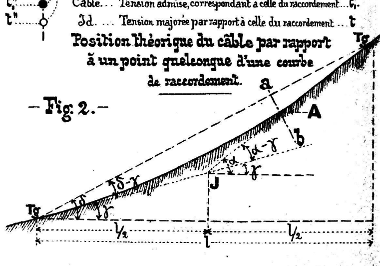
t = 12 ... A. Tension moyenne maximum.

t''1 ... Câble ... Tension admise, correspondant à celle du raccordement ... t'1.

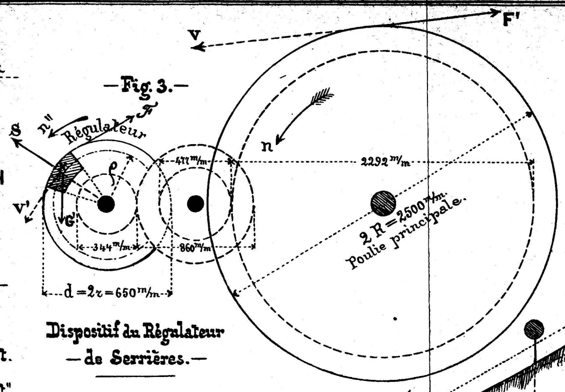
t'' ... Id. ... Tension majorée par rapport à celle du raccordement ... t.

Position théorique du câble par rapport à un point quelconque d'une courbe de raccordement.

-Fig. 2.-

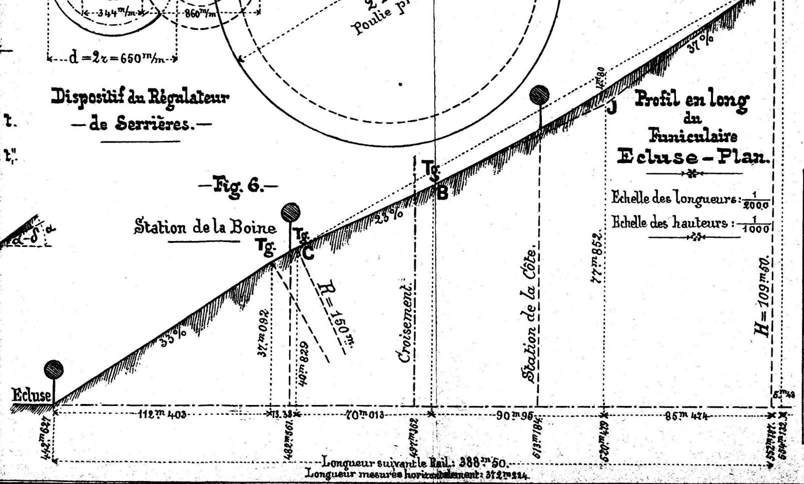


-Fig. 3.-



Dispositif du Régulateur — de Serrières.—

-Fig. 6.-



Profil en long du Funiculaire Ecluse-Plan.

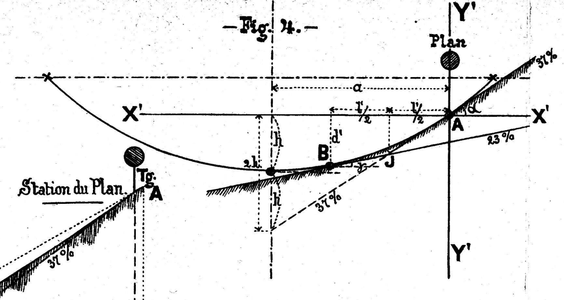
Echelle des longueurs: 1/2000

Echelle des hauteurs: 1/1000

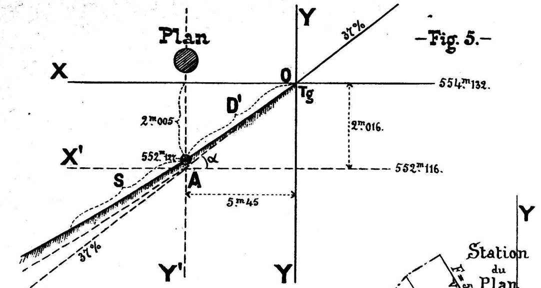
Longueur suivant le Rail: 388m50.

Longueur mesurée horizontalement: 372m224.

-Fig. 4.-



-Fig. 5.-



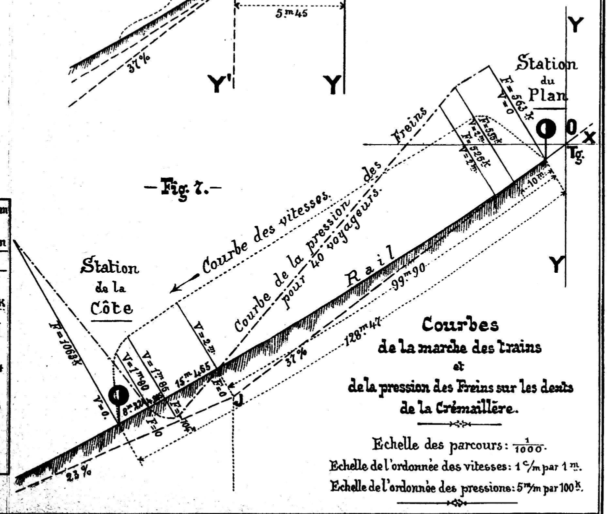
Tableau

pour la détermination de la pression du Frein sur la Crémaillère
— en un point donné par sa distance du Plan. —

	Distance(*) du Plan	à partir de l'origine de la Courbe	Coordonnées		Pente du point supérieur	Pente du point inférieur	Différence de niveau entre points considérés	Pression du Frein
	S	D	X	y	Sin α'	Sin β'	h'-h''	F
Tg.	-5m82	0m	0m	0m	0.3470	0.3134	—	—
Le Plan	0	5m82	5m45	2m005	0.3435	0.3134	109m5	563K
	10.0	15.82	14.88	5.42	0.3375	id	102.95	555
	99.9	105.72	100.23	33.22	0.2810	id	46.98	0
	115.4	121.18	115.08	37.48	0.2709	id	37.87	-104
La Côte	120.3	126.07	119.79	38.80	0.2677	0.3007	35.06	0
	128.47	134.29	127.60	40.95	0.2625	0.2487	30.62	1063
Tg.	184.42	190.23	181.90	54.67	0.2242	0.2242	4.90	—

(*) *Mesurée suivant la courbe,*

-Fig. 7.-



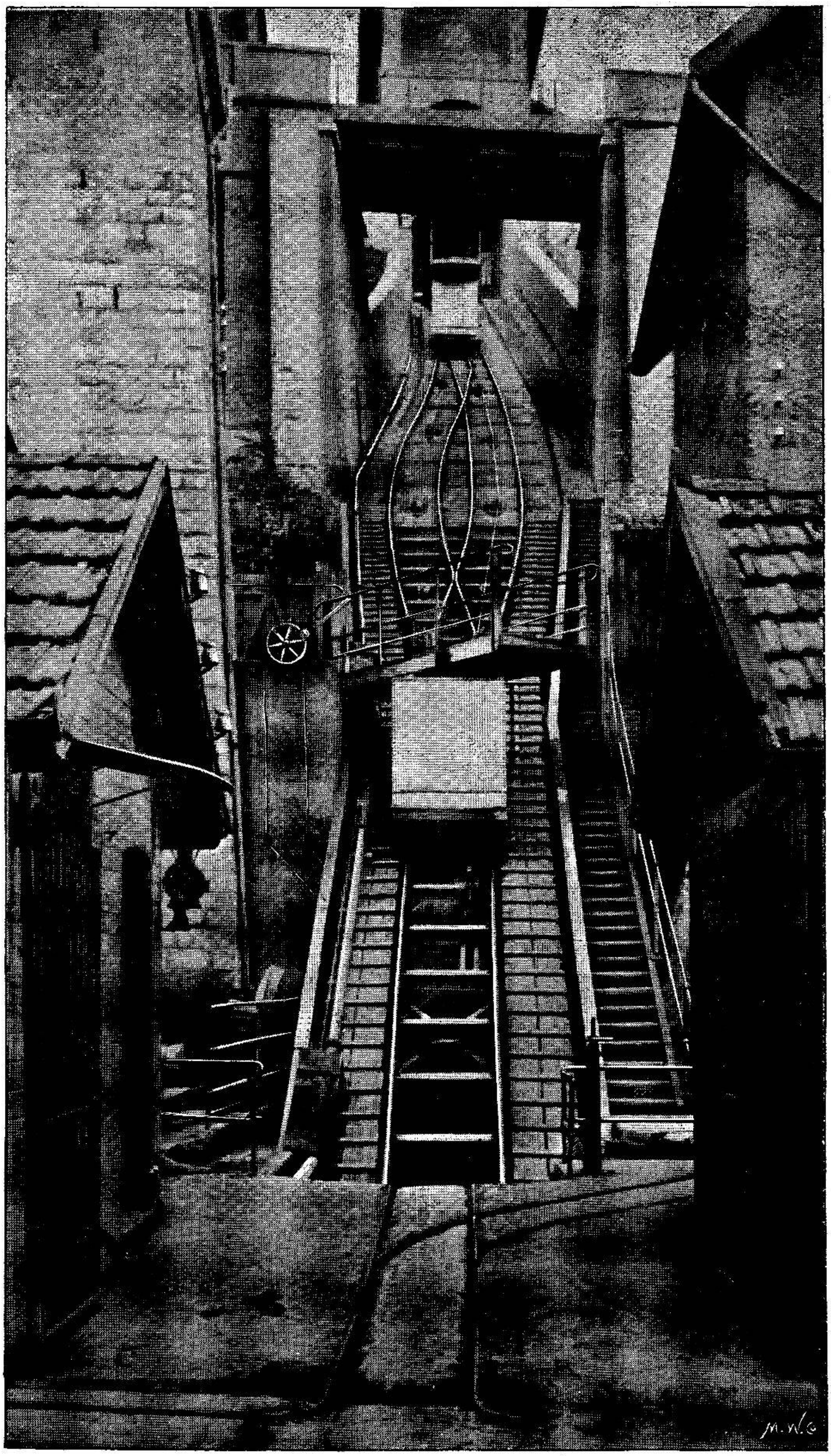
Courbes de la marche des trains et de la pression des Freins sur les dents de la Crémaillère.

Echelle des parcours: 1/1000

Echelle de l'ordonnée des vitesses: 1 c/m par 1 m.

Echelle de l'ordonnée des pressions: 5 m/m par 100 K.

Auto-lithogr. de J. Tercier, Neuchâtel.

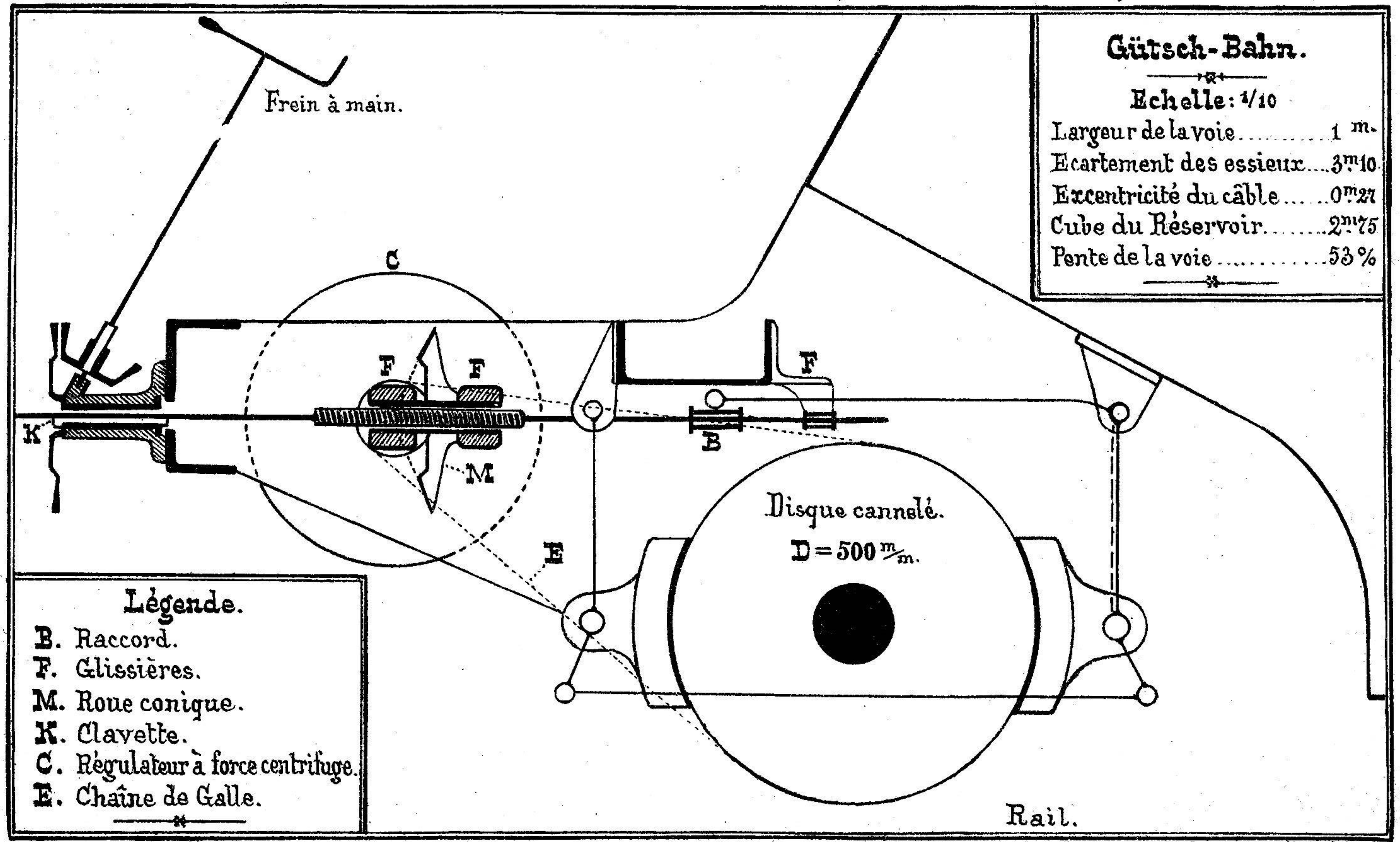


SERRIÈRES — STATION INTERMÉDIAIRE

Disposition de la plateforme du vagon au moment du déchargement.

Vu de la station inférieure.

FUNICULAIRES A CONTRE-POIDS D'EAU ET REGULATEURS DE VITESSE, - PAR Hri LADAME, INGÉNIEUR. - Pl. III.



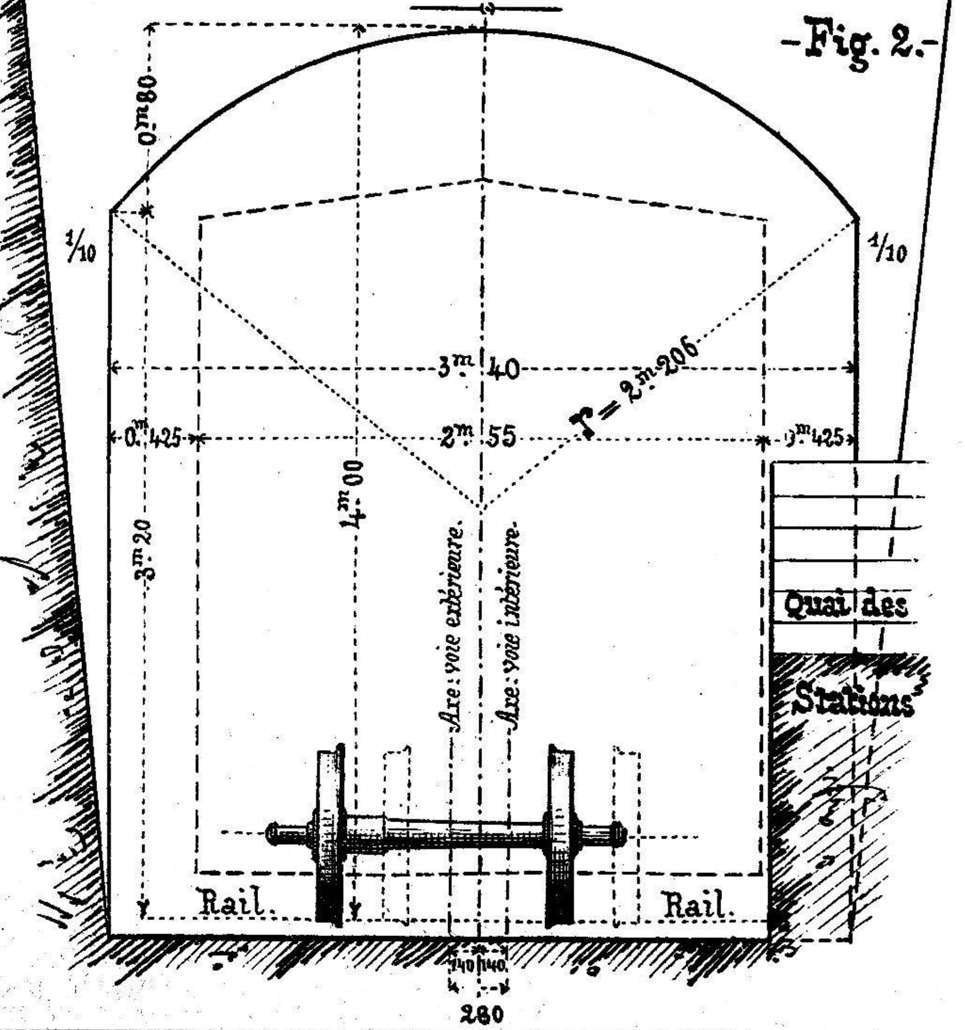
Auto-lithog. J. Torcier, Neuchâtel.

Profils types.

En tunnels (Section droite), — en tranchées, et au droit des Stations.

Echelle 1/50.

— Fig. 2. —

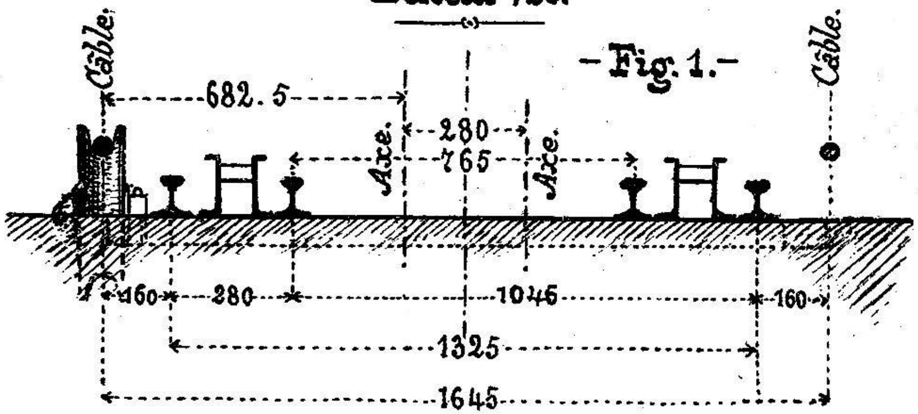


Coupe

sur la voie normale.

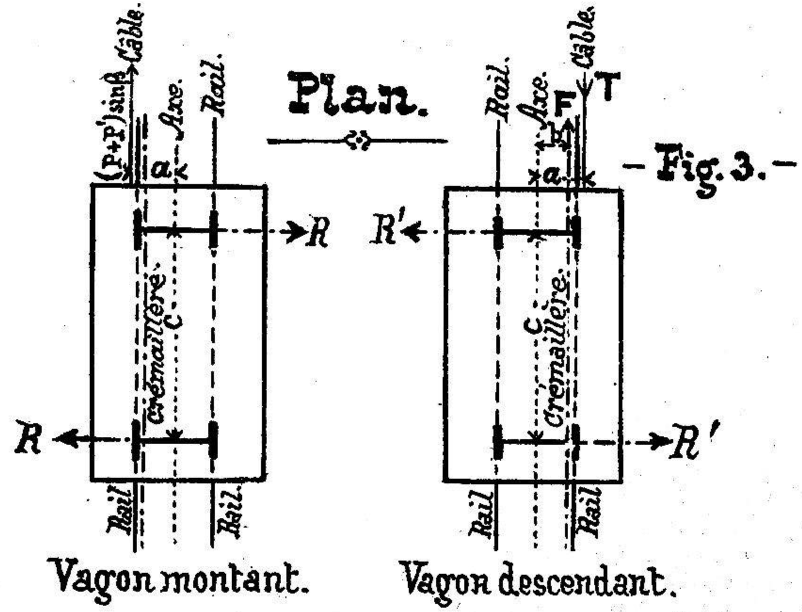
Echelle 1/25.

— Fig. 1. —



Plan.

— Fig. 3. —



Auto-lithog. de J. Tercier, Neuchâtel.

technique du contrôle fédéral des chemins de fer, dont l'ingénieur en chef m'écrivait le 2 avril 1896, soit *plus de cinq ans* après l'ouverture de la ligne:

« Bei einem Augenschein ist auf Ecluse-Plan eine auffallende Abnützung nicht wahrnembar, und es scheint dieselbe nicht grösser zu sein, als bei Seilbahn mit weniger excentrichem Seilangriff. »

SERRIÈRES

Plaque tournante sur plan incliné.

ARRÊT AUTOMATIQUE

Vu de haut, en face.