

**Zeitschrift:** Bulletin de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes  
**Band:** 13 (1887)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Étude des chemins de fer funiculaires  
**Autor:** Vautier, Alph.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-13726>

#### **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>**

conduit aux types perfectionnés qui existent aujourd'hui et le fer employé était de qualité détestable.

L'agitation de 1877 s'est renouvelée en 1884 pour les mêmes motifs, et à la suite d'une interpellation au parlement une importante adjudication va être faite. Les ingénieurs n'en restent pas moins hostiles aux voies entièrement métalliques. Toutefois des missions faites en Allemagne, sans faire disparaître les idées préconçues, les ont rendues moins absolues.

Sur les chemins de fer algériens on avait également placé, en 1867-1868, cent mille traverses du type Vautherin, primitif de Fraisons de 35 kg., type qui, nous l'avons dit, a été reconnu défectueux et trop faible. Néanmoins elles se sont assez bien comportées et depuis dix-huit ans les remplacements ont été peu nombreux. En 1885 on a de nouveau placé 20 000 traverses en acier du type Hilf de 44 kg. (semblables à celle de la S.-O.-S.) bien supérieures aux premières employées.

M. Bricka donne ensuite dans les annexes un tableau de la situation des voies métalliques en Allemagne, Hollande, Autriche et en Suisse à fin 1884, et un tableau des moments d'inertie des principaux profils de traverses.

Puis un tableau comparatif du prix par mètre courant de voies sur traverses en bois et en métal sur les chemins de fer hollandais, et un tableau des prix payés par divers chemins de fer en 1884, pour les traverses métalliques.

Il donne : un tableau des prix des traverses en bois, en France. Divers renseignements sur le matériel roulant, le trafic des chemins de fer. Les marchés sur série de prix des travaux d'entretien de la voie aux chemins de fer du grand-duché de Bade. Les relevés des frais d'entretien des voies sur traverses en bois et en métal des chemins de fer néerlandais, soit en 1884, 143 fr. 78 c. pour les traverses en bois et de 71 fr. 46 c. à 602 fr. 99 c. par km. pour les traverses métalliques, et en 1883 de 447 fr. 60 c. par km. pour les traverses en bois et de 210 à 687 fr. pour les traverses métalliques; la série des prix pour les travaux d'entretien du chemin de fer Central-Suisse.

Les cahiers des charges du Nord-Est suisse pour la fabrication des traverses métalliques.

Une note sur les méthodes employées en Belgique, Allemagne et Autriche sur l'injection des bois et leur prix de revient.

Une note sur les traverses de types nouveaux expérimentées récemment en France et en Belgique. Celles de l'Est français où l'on a placé sur un fer spécial des blocs de bois sur lesquels le rail est fixé. Il trouve que rien, dans les expériences faites avec les attaches, ne justifie l'interposition d'un bloc de bois entre le rail et la traverse.

La traverse Séverac essayée par la Compagnie du Nord et formée d'un fer à double T avec semelle rivée; le poids en est de 57 kg.

La traverse *Bernard* essayée sur le chemin de fer du Nord belge, d'un poids de 105 kg.

La traverse *Paulet et Lavalette* composée de deux cornières jumelées entre lesquelles sont rivés des coussinets en fonte qui reçoivent les rails, traverses simples de 75 kg. et traverses doubles ou de joint de 131,5 kg. essayées sur les chemins de fer de l'Etat français.

Le remarquable rapport de M. Bricka constitue le document

le plus important qui existe sur les voies métalliques, l'étude peut en être recommandée à tous les ingénieurs qui s'occupent de cette importante question.

## ÉTUDE DES CHEMINS DE FER FUNICULAIRES

par ALPH. VAUTIER, ingénieur.

### CHAPITRE PREMIER

#### Historique et classification.

Depuis plusieurs années les constructeurs de voies ferrées ont cherché les moyens de desservir un grand nombre de localités laissées de côté par le réseau des lignes à grand trafic. Il en est résulté la création de chemins de fer secondaires de divers systèmes.

La locomotive ordinaire à simple adhérence permet de circuler à petite vitesse sur des lignes dont la pente atteint 4 à 5 %. On l'emploie même sur la ligne de l'Uetliberg près Zurich sur des pentes de 7 %.

En munissant la locomotive d'une roue motrice dentée agissant sur une crémaillère fixée à la voie, M. l'ingénieur N. Riggenbach a donné le moyen de franchir, à petite vitesse, des rampes atteignant 30 % et des tracés sinués de grande longueur.

La traction par câble ou par chaîne, ou *système funiculaire*, permet de remorquer des wagons sur les rampes les plus fortes et de desservir ainsi, par le tracé le plus court, des localités à peine accessibles aux routes ordinaires. Nous nous proposons de formuler les conditions qu'on doit rechercher dans un projet de chemin de fer funiculaire, puis nous examinerons quelques-uns des engins qui leur sont spéciaux.

Avant d'entrer en matière, jetons un coup d'œil rapide sur l'histoire de ce système de traction.

Selon toute probabilité, des câbles ou des chaînes ont été employés très anciennement dans les exploitations de mines ou de carrières et ont été appliqués au service des voies de bois qui ont préludé à l'invention des chemins de fer. La première mention que nous ayons trouvée de l'emploi de la traction funiculaire au transport de voyageurs et de marchandises, est celle d'un plan incliné à 2 % de pente qui faisait partie de la première ligne de chemin de fer à locomotives ouverte entre Liverpool et Manchester en 1830.

Les locomotives de cette époque ne gravissaient guère que des pentes de 1 %, ce qui motivait l'emploi d'un câble et d'une machine fixe.

Dès lors, on établit un grand nombre de plans inclinés desservis par un câble ou par une chaîne, mais on se méfiait de leur sécurité. Perdonnet, après avoir parlé de ceux de Liège, de Styring-Vendel et de quelques autres qui existaient en 1860, remarque qu'il ne convient pas de dépasser une pente de 3 à 4 pour cent, lorsqu'on veut effectuer au moyen d'un câble un transport de voyageurs.

Grâce aux progrès considérables qui ont été faits dans la fabrication des câbles et à l'emploi de l'acier tréfilé, on est devenu plus hardi et la traction funiculaire est employée actuellement pour le service des voyageurs sur des pentes vertigineuses.

Sans chercher à dresser un catalogue des chemins exécutés

jusqu'ici, nous citerons les suivants. Ils suffiront à montrer les progrès rapides que ce système a faits depuis quelques années.

Le chemin de fer funiculaire de Lyon à la Croix-Rousse a été inauguré en 1862, il présente une pente de 0<sup>m</sup>16, et a une longueur de 489 m. Il transporte des voyageurs et est muni de freins automatiques d'une grande énergie.

Dès 1873 on construisit à San-Francisco plusieurs chemins à câbles sans fin, présentant des pentes de 0<sup>m</sup>16 à 0<sup>m</sup>19 ; ils ne transportent que des voyageurs.

Le funiculaire de Lausanne à Ouchy a été ouvert à l'exploitation en 1877. Il a 1500 m. de longueur et une pente maximale de 0<sup>m</sup>12. Le Lausanne-Gare qui lui est juxtaposé à la même pente maximale et une longueur de 324 m. Ces deux chemins font le service des voyageurs et des marchandises.

Le chemin de fer du Giessbach, près du lac de Brienz, a été inauguré en 1880. Il a 346 m. de longueur et une pente maximale de 0<sup>m</sup>32. Celui du Vésuve a 900 m. de longueur et une pente de 0<sup>m</sup>63.

Le funiculaire de Territet à Glion, près de Montreux, a été inauguré en 1883. Sa longueur est de 674 m. et ses pentes varient de 0<sup>m</sup>30 à 0<sup>m</sup>57.

Celui de Marzile à Berne a commencé son service en 1885. On a achevé dernièrement celui de Bienne à Macolin et plusieurs autres sont en voie d'exécution.

Les derniers chemins cités ne transportent que des voyageurs.

Parmi les nombreux chemins à câbles destinés aux exploitations de mines et de carrières et qui ne transportent que des matériaux, nous citerons celui de Saillon en Valais, dont la pente est de 0<sup>m</sup>80.

#### Classification.

La dénomination de chemin de fer funiculaire, adoptée aujourd'hui pour tous les chemins de fer où la traction s'opère par le moyen d'un câble ou d'une chaîne, comprend plusieurs variétés qui pourraient être classées de diverses manières. Nous remarquerons d'abord qu'elles forment deux groupes qui diffèrent beaucoup l'un de l'autre pour le mode d'action du câble et pour le tracé du profil en long.

Le PREMIER GROUPE se compose des funiculaires à câble sans fin.

Dans certains cas, le câble ou la chaîne est animé d'un mouvement continu et les wagons sont répartis sur toute sa longueur, ce qui forme une sorte de chapelet.

Le câble étant toujours tendu, soit par l'action des wagons, soit par celle d'un tenseur auxiliaire, le profil en long de ces chemins de fer peut présenter des pentes, des paliers et des contre-pentes.

La disposition en chapelet a en outre l'avantage de pouvoir fournir à un trafic considérable.

Voici deux exemples intéressants de l'emploi du câble sans fin.

4<sup>o</sup> *Les chemins de fer à chaîne flottante* sont originaires du Lancashire et ont été appliqués récemment à l'exploitation des mines de Sommorostro et de Decido dans la province de Bilbao (Espagne).

La chaîne sans fin est tendue entre deux poulies assez élevées au-dessus de la voie pour que les wagons puissent circuler au-dessous de la chaîne. Chaque wagon porte une espèce de

fourche dans laquelle les chaînes s'engagent automatiquement. Les wagons sont répartis uniformément sur la longueur de la chaîne et comme les wagons descendants sont plus chargés que ceux montants, le système entier, composé de plusieurs chaînes sans fin successives, n'exige aucune force motrice pour opérer un transport considérable de minerais.

Ce système, très convenable pour des matériaux de peu de valeur, n'est pas suffisamment expérimenté pour qu'on puisse l'appliquer aux transports de voyageurs. Le mode d'attache et la résistance des chaînes n'inspirent pas une grande confiance. M. l'ingénieur Brüll a décrit ce système dans les mémoires des ingénieurs civils. (1883, II.)

2<sup>o</sup> *Les tramways de San-Francisco* sont actionnés par un câble sans fin à mouvement continu. Le câble est logé dans un canal en fer et ciment placé sous la voie et qui présente une rainure. La voiture (dummy) porte une pièce spéciale, nommée grip, qui pénètre dans le canal et serre le câble entre ses mâchoires. Le conducteur du dummy serre ou desserre le grip, ce qui lui permet d'arrêter à volonté le train pendant que le câble continue son mouvement.

Ce système est admirablement approprié aux rues à fortes pentes et à énorme circulation de San-Francisco. Il est très coûteux comme construction et comme exploitation.

L'établissement de ces funiculaires de rues soulève des difficultés nombreuses qui ont été très habilement résolues par leurs ingénieurs. Les Annales des ponts et chaussées de France de 1877 et 1880 renferment quelques détails sur ce sujet.

A Chicago, on a adopté un système analogue dans des rues à faibles pentes et à énorme circulation, afin d'obstruer le moins possible le passage.

Ce choix était motivé aussi par le fait que les locomotives patinent beaucoup sur les rails boueux des rues. Elles n'y trouvent guère que le quart de l'adhérence ordinaire.

Le SECOND GROUPE de chemins de fer funiculaires se compose de ceux dans lesquels le câble s'infléchit sur une poulie ou sur un tambour placé au haut du tracé et s'amarre par chacune de ses extrémités à un train.

Sa longueur est telle que lorsqu'un de ces trains est à l'extrémité supérieure de la voie, l'autre occupe l'extrémité inférieure, l'un descend tandis que l'autre monte. Le câble n'est tendu que par leur poids, de sorte que le profil en long ne peut présenter aucune contre-pente. Les paliers et les parties en faibles pentes doivent être assez courts pour être franchis par la puissance vive.

Ce système a reçu le nom de *plan incliné*; nous le lui conserverons, lors même qu'il n'est pas absolument exact. Il est généralement moins coûteux que le système à câble sans fin et présente plus de sécurité grâce à la fixité de l'amarrage du câble. Le mouvement des trains étant alternatif, le trafic est moins considérable qu'avec le chapelet de wagons, mais cet inconvénient est en partie compensé par une plus grande vitesse de marche.

Ce système convient donc bien aux chemins à faible trafic et à fortes pentes tels qu'on les rencontre souvent dans les contrées montagneuses.

Les chemins de Lyon, de Lausanne-Ouchy, du Giessbach, de Territet-Glion et de Marzile sont les exemples les plus récents de ce système.

*Etude des chemins de fer funiculaires.*

Fig. 1.

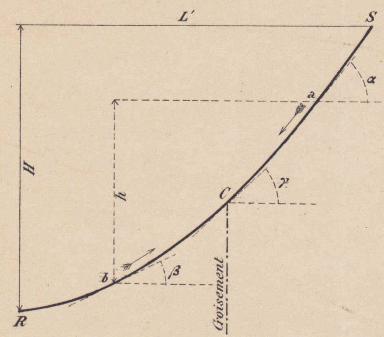


Fig. 2.

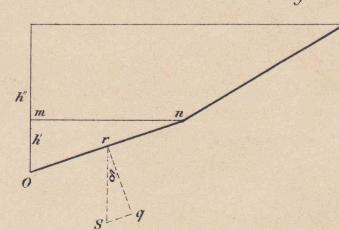


Fig. 3

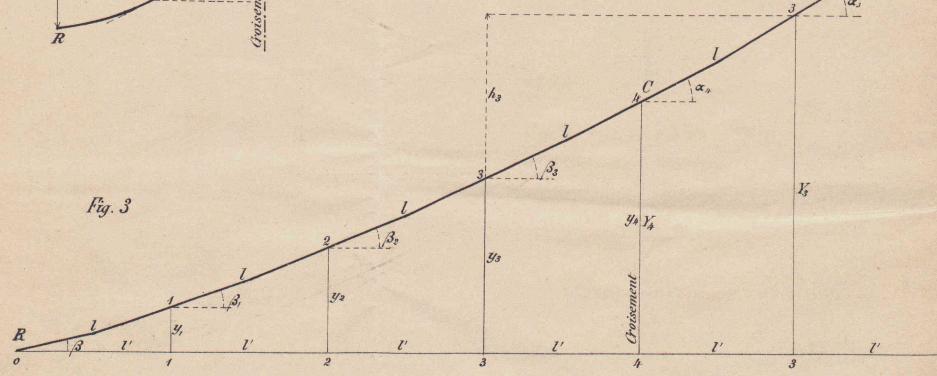


Fig. 7.

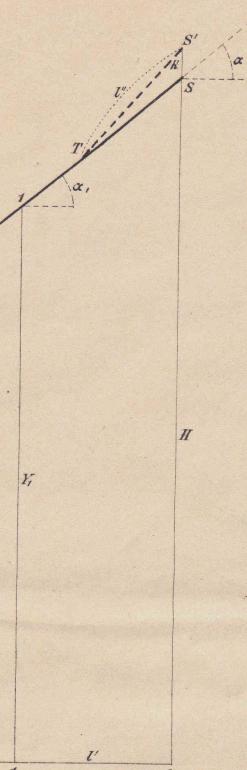
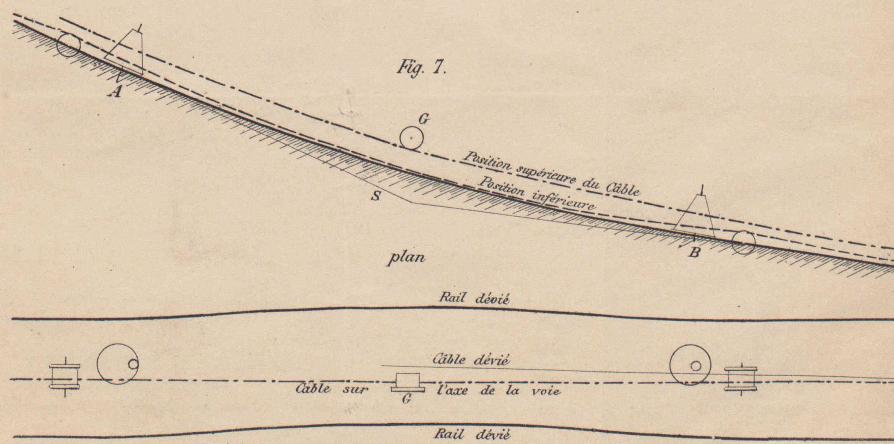


Fig. 4.

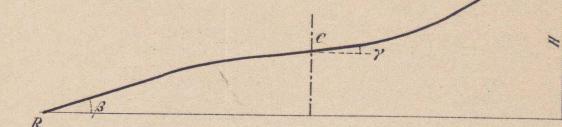


Fig. 5.

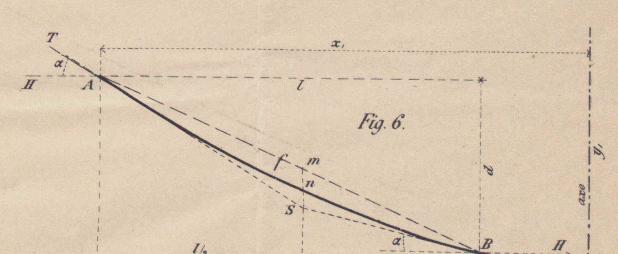


Fig. 6.

Fig. 8.

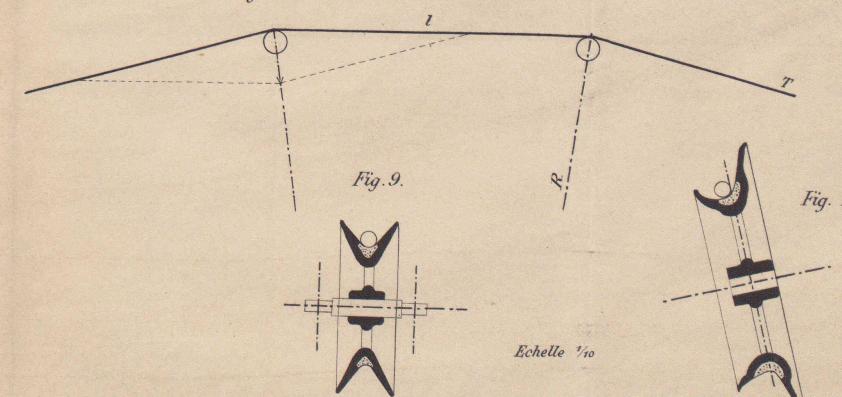


Fig. 9.

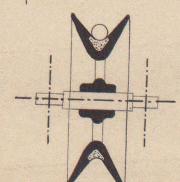
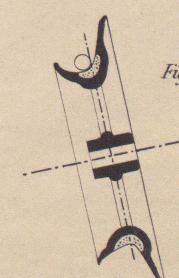


Fig. 10.



Seite / page

leer / vide /  
blank

Etude des chemins de fer funiculaires.

Fig. 13.

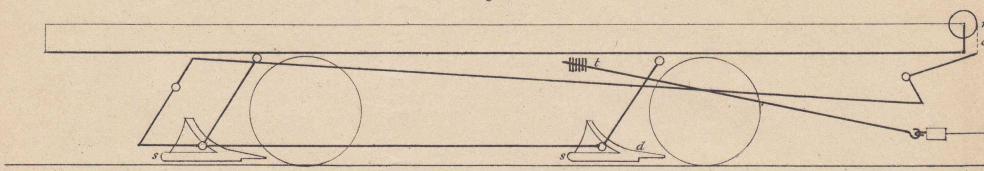


Fig. 14.

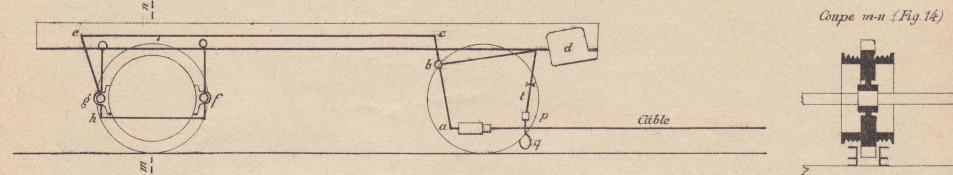


Fig. 15.

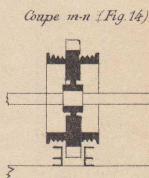


Fig. 11.

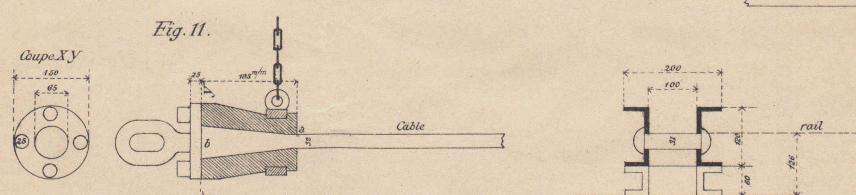


Fig. 19.

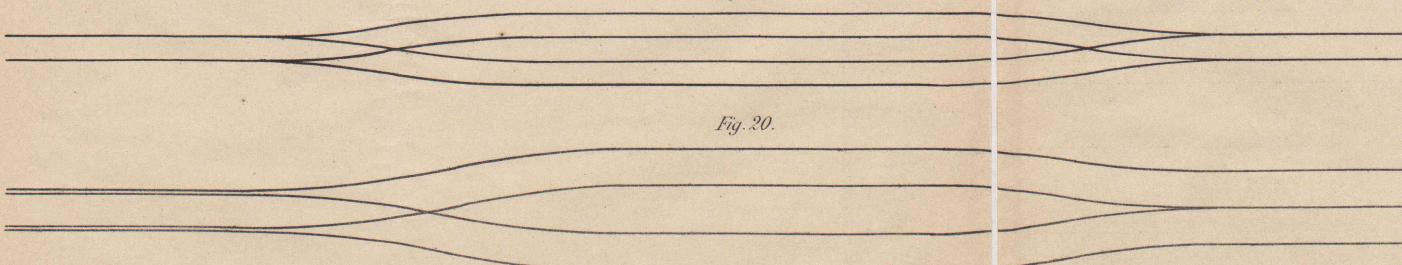


Fig. 20.

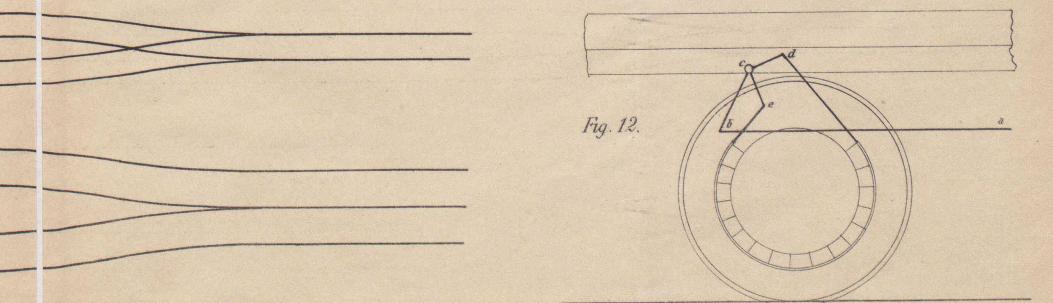


Fig. 21.

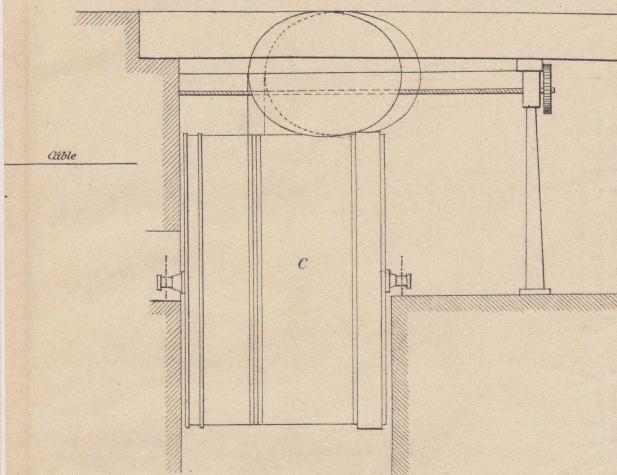


Fig. 17.

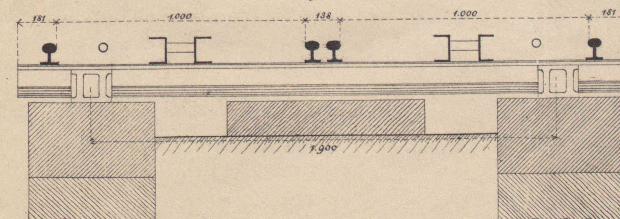
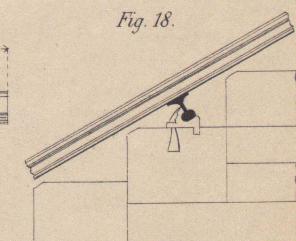


Fig. 18.



Seite / page

leer / vide /  
blank

On pourrait former un troisième groupe pour les chemins funiculaires qui n'ont qu'un seul train. Le câble est amarré par une de ses extrémités à un tambour moteur. Le Lausanne-Gare offre deux exemples de ce système. L'étude du tracé d'un pareil chemin ne diffère en rien de celle du second groupe.

L'ingénieur Abt a proposé d'employer un câble pour remorquer sur de fortes pentes les trains ordinaires à locomotives. La seconde extrémité du câble est attachée à un wagon à contrepoids, qui coopère avec la locomotive pour effectuer la montée ou ralentir la descente. Ce système appartient aussi à notre second groupe.

Les funiculaires à câbles sans fin et les plans inclinés sont *automoteurs* lorsque les wagons descendants sont toujours plus chargés que ceux qui montent et que cet excédent de poids est suffisant pour vaincre la résistance des trains et du câble.

Ces circonstances ne se rencontrent guère que dans l'exploitation des carrières ou mines de montagne.

Lorsqu'il s'agit d'un service de voyageurs, les trains montants sont ordinairement plus chargés que ceux descendants et l'on devra avoir recours à un moteur ou à un contrepoids artificiel.

Parmi les nombreux chemins automoteurs, nous citerons ceux à chaîne flottante de la province de Bilbao et le chemin du Saillon (Valais).

Les funiculaires de Lyon sont actionnés par des moteurs à vapeur; il en est de même de ceux de San-Francisco et de Chicago.

Les chemins du Giessbach et de Territet-Glion sont à contrepoids d'eau.

Ce dernier système est évidemment celui qui exige les moins de frais de traction et il est préféré partout où l'on peut se procurer, sans trop de frais, de l'eau au sommet du plan incliné.

Au funiculaire de Bienne-Macolin on n'avait de l'eau qu'au bas de la montagne, on a néanmoins trouvé avantageux de la faire monter à 450 m. de hauteur, au moyen d'une pompe à vapeur, pour alimenter le réservoir qui fournit l'eau aux caisses des wagons.

Lorsque les trains sont composés de plusieurs voitures et lorsqu'ils doivent admettre des wagons d'autres chemins de fer dépourvus de caisses à eau, le système à contrepoids d'eau n'est guère applicable. C'est le cas du Lausanne-Ouchy où l'on a utilisé une pression d'eau de 14 atmosphères, en actionnant le câble au moyen d'une turbine. On le voit, le système funiculaire présente une très grande variété de solutions et il ne saurait être question de formuler tous les problèmes que l'on rencontre dans leur étude.

Nous nous bornerons à l'examen de ceux qui se présentent habituellement dans l'élaboration des projets des chemins de fer à câble.

## CHAPITRE II

### Etude du profil en long.

#### DISTRIBUTION DES PENTES D'UN PLAN INCLINÉ

Nous avons déjà remarqué que les chemins de fer à *câbles sans fin* peuvent présenter des paliers et des contre-pentes. Leur profil en long sera donc étudié comme s'il s'agissait d'un

chemin de fer ordinaire, en ayant soin toutefois de raccorder les pentes selon les formules que nous établirons dans le § 4 ci-après.

Lorsqu'il s'agit d'un *plan incliné*, le problème n'est plus aussi simple, car le profil en long ne doit présenter ni contre-pentes, ni paliers.

On doit chercher, en outre, à répartir les pentes de manière à diminuer autant que possible la dépense de force motrice et l'intensité de l'action des freins et il est nécessaire de se rendre compte d'avance de la puissance maximale du moteur et des freins.

Nous étudierons successivement à ce point de vue les plans inclinés à contrepoids d'eau, les plans inclinés automoteurs et ceux à moteur fixe.

#### § 1. Plans inclinés à contrepoids d'eau.

Dans ce système les deux trains, composés ordinairement d'un seul wagon chacun, sont munis de grandes caisses qu'on remplit d'eau au haut du plan incliné et qu'on vide au bas.

Les trains se croisent au milieu de leur trajet et leurs positions successives sont toujours symétriques par rapport à ce point de croisement.

Nous appellerons *pentes symétriques* celles qui sont occupées en même temps, l'une par le train montant, l'autre par le train descendant et nous supposons que les deux voies ont identiquement le même profil en long, ce qui est le cas habituel.

Les plans inclinés à contrepoids d'eau que nous avons en vue ne présentent pas de stations intermédiaires. Rien n'empêcherait cependant d'en établir.

La vitesse des trains s'accélère au départ jusqu'au moment où elle atteint une valeur maximale qui se maintient jusqu'aux abords de la gare terminale et le trajet s'achève avec une vitesse décroissante. Nous ferons d'abord abstraction de cette variation de marche et nous supposerons que les trains sont animés d'une vitesse uniforme sur tout leur parcours; puis dans un paragraphe suivant, nous examinerons les périodes de démarrage et de ralentissement.

Soit  $R S$  (fig. 1) Pl. 7 le profil en long d'un plan incliné,  $L$  la longueur de la voie entre ces deux points, et  $H$  leur différence de niveau.

Désignons par  $\operatorname{tg} \gamma$  la pente au croisement, par  $\operatorname{tg} \alpha$  celle d'une partie quelconque de la voie en amont du croisement et par  $\operatorname{tg} \beta$  celle de la partie symétrique en aval.

Désignons par  $h$  la différence de niveau de ces deux points symétriques.

Soit  $p$  le poids par mètre courant de câble.

$C$  la force nécessaire pour le maintenir en mouvement en supposant la voie de niveau. (Voir au § 6.)

$P$  poids du train montant.

$P'$  poids du train descendant.

$Q$  charge d'eau du train descendant.

$f$  coefficient de résistance au roulement des trains sur une voie de niveau.

$F, F', F''$  pressions exercées par les freins en sens inverse du mouvement des trains. (Voir au § 9.)

Considérons maintenant une position quelconque des trains. Le train descendant, que nous nommerons le *train moteur*

est en  $\alpha$  et le train montant en  $b$ . Le mouvement étant uniforme, il y a équilibre entre les forces qui produisent le mouvement et celles qui l'entraînent. Nous pouvons donc écrire :

$$(P' + Q) \sin \alpha = P \sin \beta + ph + (P' + Q) f \cos \alpha + P f \cos \beta + C + F.$$

Le terme  $ph$  est le seul qui ne se comprenne pas à première vue, il est égal à la composante du poids de la partie  $A C b$  du câble qui n'est pas équilibré par le train descendant.

Si nous considérons un mètre de longueur de câble faisant avec l'horizon un angle  $\delta$  nous aurons, selon la fig. 2 :

La composante  $sq$  parallèle à la voie  $= p \sin \delta$

Or le triangle  $m n o$  donne  $h' = \sin \delta$

On a donc  $sq = ph'$  c'est-à-dire que la composante du poids du câble qui agit dans le sens du mouvement des trains est égale à son poids par mètre multiplié par la projection verticale de la longueur agissante. En additionnant toutes les composantes partielles on aura, quelle que soit la courbure affectée par le câble,  $\Sigma sq = ph$ .

Il peut paraître singulier que nous fassions intervenir le poids du câble comme force motrice, car il ne manifeste aucune tendance à descendre lorsqu'il repose sur une voie même très déclive. Cela provient du frottement considérable qu'il aurait à vaincre pour traîner sur le ballast et les traverses de la voie.

Il en est tout autrement lorsque le train le tend assez pour qu'il ne repose que sur des galets. Il est alors dans une position analogue à celle d'un véhicule sur roues.

La distance maximale des galets sera déterminée au § 7 ci-après.

Dans les applications on peut généralement remplacer  $\cos \alpha$  et  $\cos \beta$  par l'unité, dont ils diffèrent peu. Cette simplification est d'autant plus justifiée que le facteur  $f$  n'est pas déterminé d'une manière bien rigoureuse.

L'équation d'équilibre des forces qui agissent lorsque le train moteur est en amont du croisement sera donc :

$$(P' + Q) \sin \alpha - P \sin \beta - ph - (P + P' + Q) f - C = F \quad (1)$$

Lorsque le train moteur est arrivé au point  $b$ , symétrique de sa première position, on a de même :

$$(P' + Q) \sin \beta - P \sin \alpha + ph - (P + P' + Q) f - C = F' \quad (2)$$

Lorsque les trains se croisent on a :

$$(P' + Q) \sin \gamma - P \sin \gamma - (P + P' + Q) f - C = F'' \quad (3)$$

Ecrivons en outre l'équation du travail des forces qui agissent entre les points  $R$  et  $S$ .

$$(P' + Q) H - P H - (P + P' + Q) L f - C L = \Sigma F \quad (4)$$

Le symbole  $\Sigma F$  représente ici la somme des travaux des freins pendant toute la course  $SR$ .

Cette équation est indépendante des variations de vitesses qui peuvent se produire pendant le trajet, mais elle suppose que les vitesses au départ et à l'arrivée soient égales entre elles ou toutes deux nulles.

Les quatre équations fondamentales que nous venons d'établir renferment des quantités connues et invariables, ce sont  $H$ ,  $L$  et  $f$ . Les valeurs de  $p$  et de  $C$  peuvent être déterminées à priori avec une approximation suffisante.

Les poids des trains  $P$  et  $P'$  varient d'une course à l'autre, mais comme nous cherchons à déterminer le maximum du

contrepoids d'eau, il convient de donner à  $P$  la valeur maximale qu'il peut atteindre dans l'exploitation et à  $P'$  la valeur minimale.

Les quantités inconnues sont :

Les pentes des divers points de la ligne, ainsi que  $Q$ ,  $F$ ,  $F'$ ,  $F''$  et  $\Sigma F$ .

Nous verrons plus loin que  $h$  dépend des autres éléments du problème, mais il n'est pas explicitement donné.

Pour déterminer ces inconnues, nous n'avons que les quatre relations algébriques ci-dessus, mais il faut en outre qu'elles réalisent la continuité de la ligne.

Il dépend de nous de choisir parmi les profils en long qui réalisent toutes ces conditions, celui qui convient le mieux au profil du terrain naturel et exige les moindres frais de construction.

Ce choix exige quelques tâtonnements, mais on abrègera beaucoup ce travail en s'inspirant des considérations suivantes.

#### A. Etude du profil théorique.

Nous allons rechercher en premier lieu quelle sera la forme la plus avantageuse à donner au profil en long au point de vue de l'économie d'eau, en admettant que les trains sont animés d'une vitesse uniforme entre les points  $S$  et  $R$ .

Il est évident que le travail des freins doit être nul sur toute la longueur du trajet.

Nous aurons donc  $F$ ,  $F'$ ,  $F''$  et  $\Sigma F$  nuls.

L'équation (4) nous fournira la valeur du contrepoids d'eau.

$$Q = \frac{(P - P') H + (P + P') L f + C L}{H - f L} \quad (5)$$

L'équation (3) détermine la pente au croisement

$$\sin \gamma = \frac{(P + P' + Q) f + C}{P' + Q - P} \quad (6)$$

Cette valeur est entièrement connue et se retrouve dans nos calculs subséquents. Nous la désignerons par la lettre  $M$ .

Deux pentes symétriques quelconques seront données par les équations (1) et (2), car en faisant leur somme et leur différence on a

$$\sin \alpha - \sin \beta = \frac{2 p H}{P + P' + Q} \quad (7)$$

$$\sin \alpha + \sin \beta = \frac{2 (P + P' + Q) f + 2 C}{P' + Q - P} \quad (8)$$

Pour simplifier nos notations nous écrirons

$$\frac{p}{P + P' + Q} = N$$

et nous remarquons que la valeur de  $\sin \alpha + \sin \beta$  est égale à  $2M$ .

Nous aurons encore par addition et soustraction

$$\sin \alpha = N h + M \quad \sin \beta = M - N h$$

La valeur de  $h$  n'étant connue que pour les points extrêmes de la ligne, le problème serait indéterminé si nous ne faisions une convention qui assure la continuité de la courbe selon laquelle seront placés les rails.

Soit  $RS$  (fig. 3) le profil en long cherché, divisons sa longueur  $L$  en un nombre pair de parties égales que nous numérotions à partir des deux extrémités de manière que les parties

symétriques de la voie aient le même numéro et les mêmes indices.

Nous admettrons que les projections horizontales  $l'$  de ces divisions  $l$  de la ligne soient aussi égales entre elles, ce qui est peu éloigné de la vérité en raison de la très faible courbure de la ligne R C S.

Nous supposons connus les divers angles d'inclinaison  $\beta \beta_1 \beta_2 \dots$  et leurs symétriques  $\alpha \alpha_1 \alpha_2 \dots$  et nous traçons ces diverses pentes de manière que deux pentes successives se coupent au milieu de la distance entre deux ordonnées successives.

Dans ces conditions nous pourrons calculer les ordonnées des points 1, 2, 3, 4 et nous en déduirons l'équation générale de la courbe qui satisfait au présent problème.

#### Tableau des ordonnées.

##### Partie inférieure.

$$y_1 = \frac{l}{2} (\sin \beta + \sin \beta_1)$$

$$y_2 = \frac{l}{2} (\sin \beta + 2 \sin \beta_1 + \sin \beta_2)$$

$$y_3 = \frac{l}{2} (\sin \beta + 2 \sin \beta_1 + 2 \sin \beta_2 + \sin \beta_3)$$

$$y_4 = \frac{l}{2} (\sin \beta + 2 \sin \beta_1 + 2 \sin \beta_2 + 2 \sin \beta_3 + \sin \beta_4)$$

##### Partie supérieure.

$$Y_1 = H - \frac{l}{2} (\sin \alpha + \sin \alpha_1)$$

$$Y_2 = H - \frac{l}{2} (\sin \alpha + 2 \sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)$$

$$Y_3 = H - \frac{l}{2} (\sin \alpha + 2 \sin \alpha_1 + 2 \sin \alpha_2 + \sin \alpha_3)$$

$$Y_4 = H - \frac{l}{2} (\sin \alpha + 2 \sin \alpha_1 + 2 \sin \alpha_2 + 2 \sin \alpha_3 + \sin \alpha_4)$$

Nous avons par définition  $h = Y - y$  de sorte que pour le point 1 par exemple, on a :

$$h_1 = H - \frac{l}{2} (\sin \alpha + \sin \alpha_1 + \sin \beta + \sin \beta_1) = H - 2lM$$

On trouverait de la même manière

$$h_2 = H - 4lM$$

$$h_3 = H - 6lM$$

$$h_4 = H - 8lM$$

Nous pouvons maintenant calculer une ordonnée quelconque en fonction de quantités connues.

Pour la quatrième, par exemple, nous aurons à faire l'addition suivante des valeurs des sinus :

$$\sin \beta = M - NH$$

$$2 \sin \beta_1 = 2M - 2NH + 4lMN$$

$$2 \sin \beta_2 = 2M - 2NH + 8lMN$$

$$2 \sin \beta_3 = 2M - 2NH + 12lMN$$

$$\sin \beta_4 = M - NH + 8lMN$$

d'où

$$y_4 = \left\{ 2 \times 4(M - NH) + [2(2 + 4 + 6) + 8] l MN \right\} \frac{l}{2}$$

Nous discernons ici la loi à appliquer au calcul d'une ordonnée quelconque de rang  $m$  et nous observons que les termes 2, 4, 6, sont en progression arithmétique dont la raison est 2 et le pre-

mier terme 2 et qu'il y aura toujours  $m - 1$  termes de cette progression dans la valeur de  $y_m$ .

On peut donc écrire :

$$y_m = \frac{l}{2} \{ 2m(M - NH) + [2(m^2 - m) + 2m] l MN \}$$

ou  $y_m = lm(M - NH) + l^2 m^2 MN$ .

Le facteur  $lm$  indique la longueur de voie qui sépare le point considéré de l'origine ; si donc nous nommons  $L'$  la longueur de la projection horizontale de la ligne et  $L$  la longueur de la voie, on aura avec une exactitude suffisante  $x = lm = \frac{L'}{L}$ .

L'équation générale de la courbe du profil en long théorique devient donc

$$y = \frac{L}{L'} (M - NH) x + MN \frac{L^2}{L'^2} x^2 \quad (9)$$

C'est l'équation d'une parabole qu'il sera facile de construire par points.

$$\text{Sa longueur totale est donc } L = L' + \frac{H^2}{2L'}$$

Cette courbe s'écarte peu de la pente uniforme qu'on obtiendrait en traçant la ligne droite R S et cet écart dépend uniquement du poids du câble ; cependant on ne pourrait substituer cette pente uniforme à la courbe théorique sans grever l'exploitation d'une dépense d'eau assez notable, ainsi que nous le verrons dans l'exemple numérique ci-après.

Un chemin de fer funiculaire à contrepoids d'eau a une longueur de  $1500m 45 = L$ . Sa longueur en plan est de  $1487m = L'$ . Ses extrémités ont une différence de niveau  $H = 200m$ .

Le poids du train montant le plus chargé  $P = 11000kg$ , celui du train descendant à vide  $P' = 7000kg$ . Le poids  $p$  du câble  $= 1kg5$  par mètre et la force nécessaire pour le faire mouvoir est évaluée à  $C = 90kg$ , ainsi que nous le verrons au § 6 ci-après.

Nous ferons  $f = 3kg$  par tonne.

L'équation (5) nous donne le poids d'eau nécessaire pour entretenir un mouvement uniforme

$$Q = 5200kg$$

Le facteur  $M$  est donné par l'équation (6)

$$M = \frac{(P + P' + Q)f + C}{P' + Q - P} = 0,133$$

$$N = \frac{p}{P + P' + Q} = 0,0000646$$

La pente maximale  $\sin \alpha = 0,146$  et la pente minimale  $\sin \beta = 0,120$ .

L'équation de la courbe sera :

$$y = 0,12106 x + 0,00000874 x^2$$

Le point de croisement sera à  $95m$  en dessus du plan de comparaison passant par le point R, tandis que la pente uniforme aurait une altitude de  $100m$  en ce point de croisement.

Si nous donnions à la voie une pente uniforme le contrepoids d'eau devrait être calculé au moyen de l'équation (1) en faisant  $\sin \alpha = \sin \beta = 0,133$   $h = 200$  et  $F = 0$ .

On trouve ainsi qu'il faudrait  $7508kg$  d'eau au lieu de  $5200kg$  qu'exige le profil théorique.

L'équation (2) dans laquelle on donnerait à  $Q$  la valeur de 7508 kg. montre que les freins devraient exercer une pression de 600 kg. contre les dents de la crémaillère.

Cet exemple suffit pour montrer que l'étude du profil en long a une importance réelle et qu'une légère modification de pente influe notablement sur la dépense d'eau et sur le volume du réservoir qu'on doit placer sous les wagons. Ce dernier élément n'est point indifférent, car la place disponible est restreinte par les essieux et les freins.

On remarquera aussi que les frais d'acquisition et d'entretien du câble, des freins et de la voie sont proportionnels à la charge des wagons multipliée par la pente maximale du tracé et que notre profil en long théorique donne à ce produit la plus faible valeur possible.

Pour arriver à une formule pratique nous avons admis l'égalité des longueurs partielles  $l'$ , ce qui n'est pas rigoureusement exact. Il en résulte que lorsqu'on calcule  $y$  pour  $x = L'$ , on obtient une valeur un peu différente de  $H$ . Dans notre exemple on a  $y = 199^m 36$  au lieu de 200 m.

Pour calculer les cotes intermédiaires du profil en long on ajoutera au facteur de  $x^2$  la valeur  $\frac{H-y}{x^2}$ . Ce facteur devient

$$\text{dans notre cas } \frac{0,64}{(1482)^2} + 0,00000874 = 0,00000903.$$

(A suivre.)

#### COEFFICIENTS DU TRAVAIL DU FER DANS LES PONTS

Le numéro des Annales des ponts et chaussées de France de mars 1887 renferme une note sur la construction des ponts métalliques à poutres droites en Allemagne, en Hollande, en Autriche et en Suisse, de M. Bricka, ingénieur en chef des ponts et chaussées.

L'auteur donne les dessins d'un grand nombre de tabliers métalliques de divers systèmes et indique le caractère spécial que les constructeurs des divers pays donnent à leurs ouvrages.

La Suisse n'y figure que pour quelques réflexions sur certains ponts de la ligne du Gothard.

Les coefficients admis pour le travail maximal du fer et de l'acier diffèrent notablement d'un pays à l'autre.

L'administration des ponts et chaussées de France n'admet que rarement un travail de plus de 600 kg. par centimètre carré pour les pièces en fer forgé ou laminé, tandis qu'en Allemagne on emploie fréquemment la formule de Launhardt :

$$R = 800 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{S_{\text{mini}}}{S_{\text{maxi}}} \right) \text{ par centimètre carré,}$$

dans laquelle  $S_{\text{mini}}$  indique le moindre effort auquel la pièce peut être soumise et  $S_{\text{maxi}}$  le plus grand effort de compression ou de traction.

Cette formule n'est applicable qu'aux pièces qui sont ou toujours tendues ou toujours comprimées.

Lorsque la pièce considérée est tantôt tendue tantôt comprimée, on emploie la formule de Weyrauch :

$$R = 700 \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{S_{\text{mini}}}{S_{\text{maxi}}} \right) \text{ par centimètre carré.}$$

$S_{\text{mini}}$  et  $S_{\text{maxi}}$  indiquent les valeurs absolues des efforts sans tenir compte du signe de l'un ou de l'autre. Ainsi, pour une pièce soumise seulement à un poids mort invariable, on aurait  $R = 1200$  kg., tandis que pour une pièce soumise alternativement à des efforts de pression et de traction égaux  $R = 350$  kg. seulement.

Pour l'acier la première formule devient

$$R = 1200 \left( 1 + \frac{9}{5} \frac{S_{\text{mini}}}{S_{\text{maxi}}} \right) \text{ par centimètre carré}$$

la seconde

$$R = 1100 \left( 1 - \frac{5}{11} \frac{S_{\text{mini}}}{S_{\text{maxi}}} \right) \text{ par centimètre carré.}$$

On fait travailler les rivets de première qualité à 800 kg. par centimètre carré.

En Hollande on n'admet guère qu'un travail de 500 à 600 kg. pour les longueurs et pièces de pont et de 600 à 700 kg. pour les poutres principales. On était plus hardi il y a quelques années, ce qui a eu, paraît-il, des inconvénients.

En Autriche, on admet 800 kg. par centimètre carré pour les pièces soumises à la compression ou à la traction sans avoir égard à la variation des efforts.

Les rivets travaillent à raison de 600 kg. par centimètre carré.

Ces formules et coefficients ne sont pas appliqués rigoureusement à tous les ouvrages, mais expriment assez bien, d'après M. Bricka, la tendance des constructeurs de ces divers pays.

Les usages de notre canton se ressentent surtout du voisinage de la France, mais on admet ordinairement un travail de 700 kg. par centimètre carré pour les ponts-routes.

LA RÉDACTION.

Les cent vingt-neuf projets pour la reconstruction de la façade du dôme de Milan sont actuellement exposés au palais Brera à Milan. Le jury choisira dans ce nombre de dix à quinze projets, dont les auteurs seront appelés à un nouveau concours restreint.

A première vue, le résultat du concours est très satisfaisant. Il est étonnant de constater combien il a été trouvé de solutions différentes à un programme en apparence si simple. Les façades et coupes sont en général dessinées avec beaucoup de talent et de goût.

Des architectes originaires de la plupart des Etats de l'Europe ont pris part au concours. En tête se trouvent les Italiens, puis viennent les Français et les Allemands. Il est arrivé des projets d'Angleterre, d'Espagne, de Belgique, de Hollande et même du Turkestan.

La plupart des artistes ne se sont pas contentés de modifier la façade actuelle du dôme pour en harmoniser le style avec celui du reste de l'édifice. On a cherché en général à créer quelque chose de neuf; la façade a été flanquée de tours, les unes couronnées de coupoles, les autres surmontées de flèches. Un projet présente deux clochers de deux cent mètres de hauteur, un autre donne au dôme actuel neuf nouvelles tours !

En tout état de cause, on peut affirmer que le concours n'aura pas été inutile, et que la question épiqueuse de la reconstruction de la façade du dôme de Milan a fait un pas en avant.

H. V.