

Le percement des grands tunnels sous les alpes: note historique

Autor(en): **Meyer, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes**

Band (Jahr): **14 (1888)**

Heft 5

PDF erstellt am: **13.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-14454>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

ayant

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$$

$$T - H = p \int_0^h dy = ph$$

et

$$H = T - ph$$

on a également

$$T' - H = ph' \quad \text{ou} \quad T' = T - p(h - h')$$

mais

$$h - h' = y'$$

d'où

$$T' = T - py' \tag{4}$$

L'effort de traction en un point quelconque est donc égal à l'effort maximum T, moins le poids du câble par mètre courant multiplié par l'ordonnée du point considéré.

Cette formule étant indépendante de la forme de la courbe s'applique également à une droite, ou à n'importe quel profil admis pour un plan incliné.

Soit de plus t la tension maximale par millimètre carré de section métallique.

q la section totale des fils qui composent le câble.

$\gamma = 0,0000078$ le poids du millimètre cube des fils de fer ou d'acier.

0,00000056 constante, tenant compte de l'écrouissage des fils par suite de leur torsion, et du poids du chanvre qui forme l'âme, pour câbles de 32 à 33 mm. de diamètre.

La longueur des fils étant les $\frac{9}{8}$ environ de celle du câble

$$p = \frac{9}{8} 1000 (\gamma + 0,00000056) q$$

ou

$$p = 0,0094 q$$

mais

$$T = tq$$

Divisant ces équations l'une par l'autre

$$\frac{T}{p} = \frac{t}{0,0094} \tag{5}$$

d'où

$$\left. \begin{aligned} t &= 0,0094 \frac{T}{p} \\ p &= 0,0094 \frac{T}{t} \\ q &= \frac{T}{t} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

on a de même

$$\frac{T'}{p} = \frac{t'}{0,0094} \quad \text{mais} \quad \frac{T'}{p} = \frac{T}{p} - y'$$

d'où

$$t' = t - 0,0094 y' \tag{7}$$

La tension en un point quelconque d'un plan incliné est donc égale, quelque soit son profil, à la tension maximale admise pour la traction, moins 0,0094 fois l'ordonnée du point considéré.

pour $y' = 0 \quad t' = t$

» $y' = h \quad t' = t - 0,0094 h = t_0$

En portant $t' - t_0$ comme ordonnée pour chaque x correspondant on obtiendrait la courbe des tensions A' B' S' (fig. 1). Cette courbe est également une parabole dont le paramètre

$$2c = \frac{a^2}{0,0094 h}$$

Nous avons vu que $V' = \frac{a}{h} \frac{h'}{a'} V$ et $\frac{h'}{a'} = \frac{h}{a^2} (a - x')$

d'où

$$V' = V - \frac{V}{a} x'$$

V et a étant constants, le lieu géométrique des composantes verticales est une ligne droite.

De l'équation 1, on peut déduire le poids, et par suite la longueur d'un arc quelconque de la parabole décrite par le câble à partir du point A.

Ayant

$$a' = a - x$$

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

on a

$$V - V' = (L - L') p$$

et

$$L - L' = x + \frac{a tg^2 \alpha - a' tg^2 \alpha'}{6}$$

(A suivre.)

LE PERCEMENT DES GRANDS TUNNELS

SOUS LES ALPES

Note historique par J. MEYER, ingénieur.

Au moment où la question du percement du Simplon est sur le point de passer dans le domaine de l'exécution, une revue rétrospective des conditions dans lesquelles se sont effectués les grands percements faits jusqu'ici, peut présenter un certain intérêt.

Mont Cenis.

La première idée de franchir le mont Cenis ou plutôt le col de Fréjus par un chemin de fer reliant la Savoie (Maurienne) au Piémont est due à Joseph Médail, de Bardonnèche, commissaire aux douanes, puis entrepreneur de routes à Lyon (1828). Dès 1832, il s'occupait de cette étude, traçant des plans, relevant les distances entre Bardonnèche et Modane. Il avait relevé l'endroit où le massif des Alpes offre le moins d'épaisseur.

Médail avait fait de ce tunnel le rêve de sa vie. Dans le projet qu'il rédigea, il traversait les Alpes au même point qui fut choisi plus tard par les ingénieurs. C'est le 20 juin 1841 qu'il présenta son projet au gouvernement sarde, mais il plaçait le tunnel plus haut de manière à ne lui donner que 5000 m. environ de longueur; personne, à ce moment, n'aurait osé songer à percer un tunnel de plus de 12 km. avec deux seules attaques possibles.

Ce n'est qu'en 1845 qu'on commença à s'occuper sérieusement de ce percement. A cette époque on exécutait le chemin de fer de Gènes à Turin qui comportait le plan incliné du Giovi, à la traversée des Apennins, avec des rampes de 35 mm. M. Henri Maus, ingénieur belge (le constructeur du plan incliné de Liège), fut chargé de la direction de la construction de ce chemin de fer et de l'étude des moyens de franchir ce plan incliné de 10 km. de longueur. M. Maus qui avait construit le plan incliné de Liège, proposait aussi pour l'exploitation de celui-ci un câble de remorque mû par des roues hydrauliques.

Pendant que M. Maus construisait la ligne de Gènes à

Calcul des Câbles métalliques.

Ladame
Ing.

Fig. 1.

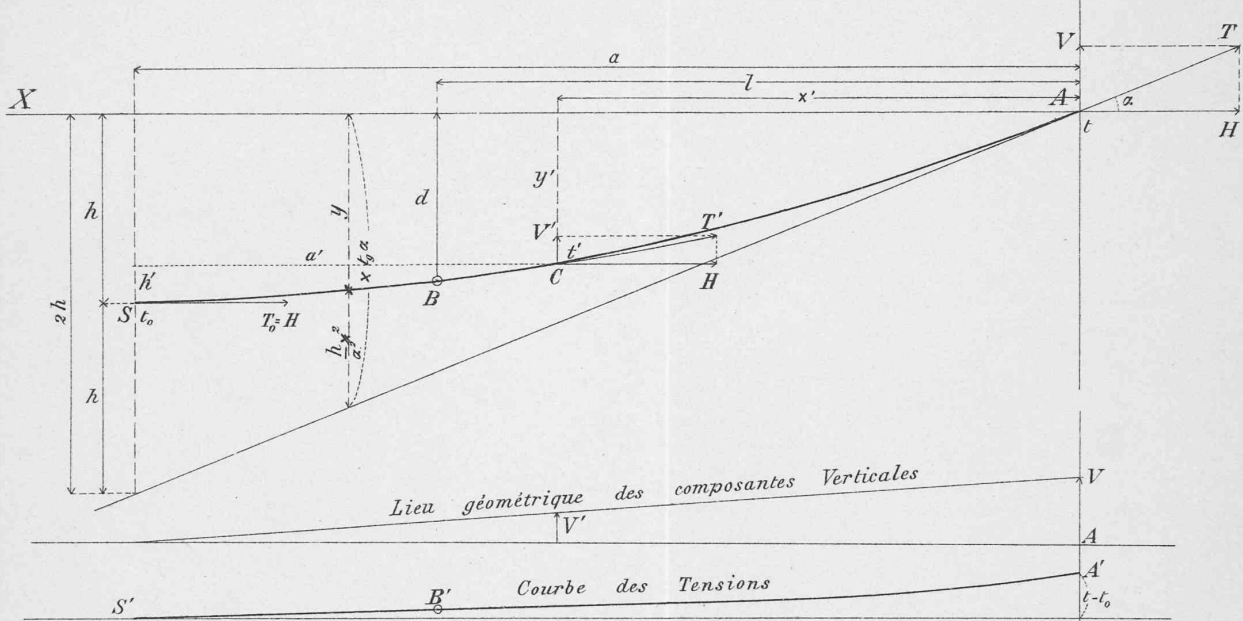


Fig. 2.

Application à un profil donné

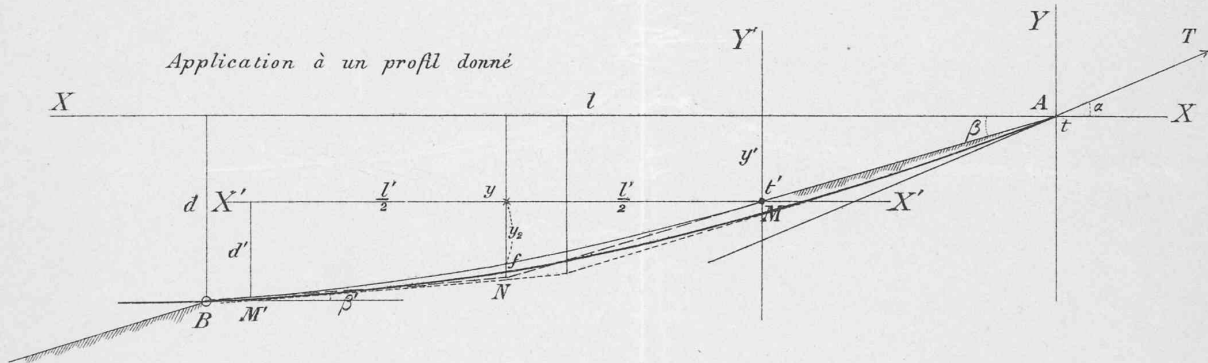


Fig. 3.

Compensation du poids du câble

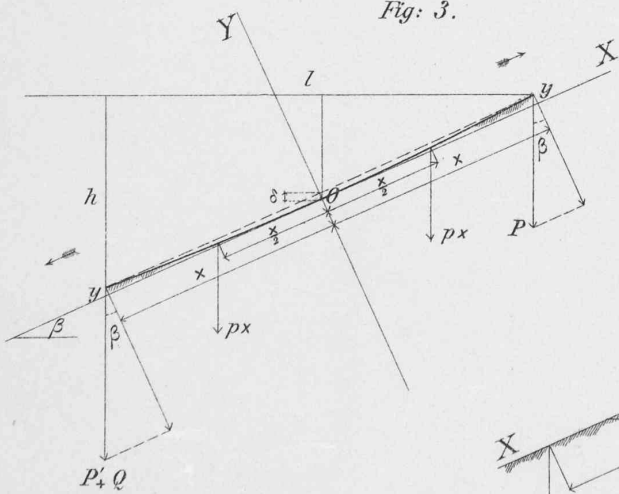
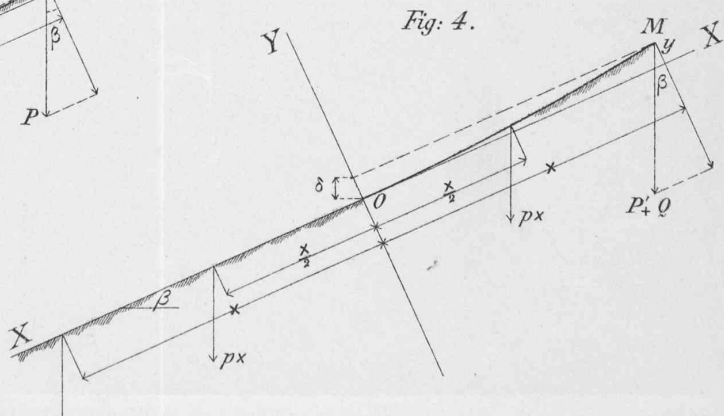


Fig. 4.



Seite / page

leer / vide /
blank

Turin, le gouvernement sarde le chargea de l'étude du passage des Alpes entre Suze et Modane.

Dans son premier rapport d'août 1845, il proposa un tunnel de 10 km., relié aux vallées par cinq plans inclinés à 35 mm. sur lesquels les convois auraient été remorqués par des machines funiculaires.

M. Angelo de Sismonda, géologue, étudiait la structure du massif. Les travaux furent continués par M. Elie de Beaumont.

Il fit, avec M. Maus, des essais sur la dureté des roches, d'où il résulta que, par les moyens connus à cette époque, il faudrait 35 à 40 ans pour percer cette galerie.

C'est alors que M. Maus s'occupa d'étudier une machine pour percer plus rapidement le rocher. En 1846, il obtint un crédit pour la construction d'un appareil perforateur de son invention. Avec cet appareil, l'avancement en petite galerie s'obtenait au moyen d'une machine composée de ciseaux mis en mouvement par des ressorts et qui auraient découpé la roche en blocs adhérents seulement à l'arrière, et qu'on aurait détachés au moyen de coins. Les moteurs auraient été des roues hydrauliques qui auraient transmis le mouvement aux ressorts portant les ciseaux au moyen de câbles et de poulies. (Cet appareil perforateur de M. Maus est décrit et figuré dans l'ouvrage de M. Maxime Hélène : *Les nouvelles routes du globe*, p. 231 à 234. — Paris, G. Masson.)

Le rapport définitif de M. Maus sur la traversée des Alpes, est du mois de juin 1848. Il proposait un tunnel de 12 790 m. de longueur en pente continue de 19 mm., dont l'entrée méridionale à Bardonnèche eût été à l'altitude de 1364 m., suivant à peu près la direction indiquée par Joseph Médail. Il comptait achever en cinq ou six ans la galerie d'avancement et évaluait le coût du tunnel achevé à 14 millions, moins la voie. Ce rapport fut renvoyé à l'examen d'une commission technique dans laquelle figuraient entre autres MM. Paléocapa, Ménabrea et Sismonda.

Mais survint en 1849 la guerre avec l'Autriche et les revers du Piémont qui amenèrent du découragement.

C'est en 1852 que M. le professeur Daniel Colladon, de Genève, bien connu par de nombreux travaux et expériences de physique et de mécanique, proposa d'actionner les perforatrices au moyen de l'air comprimé par des pompes. En 1850 déjà il s'occupait de cette application et demanda des renseignements à Turin sur les conditions pour obtenir des brevets d'invention. Des expériences lui avaient fait découvrir que la résistance de l'écoulement de l'air comprimé dans de longues conduites de fort diamètre était de beaucoup inférieure à ce qu'on avait admis jusqu'ici, et que dès lors il y avait possibilité, par ce moyen, de transmettre économiquement à de grandes distances une force motrice considérable. Il déposa sa demande de brevet le 30 décembre 1852. Celle-ci fit l'objet d'un rapport du 23 janvier 1853 de M. Ménabrea qui louait fort cette ingénieuse invention. Un premier brevet fut accordé en 1852. Ce brevet fut renouvelé et confirmé le 1^{er} septembre 1853. Comment se fait-il que son invention ne fut pas appliquée au percement du tunnel et qu'il ne fut pas appelé à en récolter le profit ? C'est ce que nous verrons sans nous l'expliquer toutefois ou, sans que ce procédé du gouvernement sarde puisse se justifier.

En 1855, M. Bartlett, ingénieur anglais, entrepreneur de

travaux sur la ligne de Culoz à Chambéry, inventa une machine perforatrice destinée à faire des trous de mine et qui était actionnée par la vapeur.

L'idée de M. Colladon de l'actionner par l'air comprimé était bien supérieure. (Cette machine de M. Bartlett est figurée et décrite dans l'ouvrage de Louis Figuier, intitulé : *Les nouvelles conquêtes de la science*, p. 97 à 99).

En 1853, MM. Sommeiller, Grandis et Grattoni, ingénieurs sardes, déposèrent une demande de brevet pour une machine destinée à appliquer la force des chutes d'eau à la compression de l'air, machine qu'ils appelaient : *bélier compresseur*.

La description en est donnée entre autres dans l'ouvrage déjà cité de Figuier, p. 132-139, ainsi que dans l'ouvrage de M. A. Deviller : *Des travaux de percement du tunnel sous les Alpes*. — Paris, 1863.

M. Germain Sommeiller naquit en 1815, à Saint-Jeoire, près Bonneville ; M. Severino Grattoni est né à Voghera en Piémont, et M. Sébastien Grandis est né en 1817, à Borgo Sandalmazio près de Coni en Piémont. Tous trois avaient étudié la science de l'ingénieur à l'université de Turin.

Ce bélier compresseur devait d'abord servir à envoyer de l'air dans un tube, pour y pousser un piston. Ce tube devait être placé entre les rails, et le piston devait hisser les convois. Leur intention était de l'appliquer à l'exploitation de la rampe du Giovi pour y remorquer les trains. Ils demandèrent un brevet et une avance à l'Etat de 90 000 fr. pour faire un essai. Ils signèrent à cet effet un traité avec l'Etat sarde, le 28 mars 1854. Ils annonçaient des économies considérables qu'ils devaient partager pendant quinze ans avec l'Etat pour les rémunérer de leurs droits de brevets. Ce système fut surtout appuyé par M. de Cavour qui fit approuver la convention par la chambre, le 19 juin 1854.

Ces essais ne réussirent pas et les inventeurs ne purent rembourser l'avance de l'Etat. C'est alors que vint à M. Cavour l'idée d'utiliser ce bélier compresseur pour actionner les outils perforateurs pour le percement du mont Cenis. La loi du 15 août 1857 autorisa le gouvernement à construire cette traversée des Alpes conformément au projet des ingénieurs Ronca, Grattoni, Sommeiller et Grandis.

Sommeiller avait de son côté inventé une perforatrice se rapprochant, comme idée générale, de celle de Bartlett, quoique bien simplifiée, mais actionnée par l'air comprimé au lieu de la vapeur, cet air comprimé étant produit par les béliers compresseurs. Mais ces béliers compresseurs étaient un engin volumineux, coûteux et peu pratique. Ces énormes appareils avaient 26 m. de hauteur et l'eau agissant par choc pour la compression le rendement était très faible ; à Modane (Fourneaux) on élevait même l'eau de l'Arc dans un réservoir à 27 m. de hauteur pour la laisser retomber dans le bélier. On avait dépensé 2 400 000 fr. pour l'installation de ces béliers compresseurs, leur rendement fut déplorable, on dut les remplacer par des pompes à piston liquide comme M. Colladon l'avait proposé en 1852 déjà, et ce n'est qu'à partir de ce moment que la perforation mécanique suivit une marche normale. On se demande comment on avait pu violer les droits qu'assuraient à M. Colladon ses brevets de 1852, 1855 (attestati di privativa). La satisfaction tardive qui lui fut conférée au jour de l'inauguration de la ligne du mont Cenis, lorsque, par lettre du ministre

M. Sella, celui-ci lui annonça que, pour le récompenser des mérites qu'il s'était acquis par ses travaux et spécialement par l'emploi de l'air comprimé pour la perforation des galeries souterraines, le roi lui décernait le grade de commandeur de l'ordre de Saint-Maurice et Lazare, cette satisfaction ne peut pas être considérée comme suffisante. Il eut été plus juste de respecter ses droits d'inventeur et de lui assurer une participation au travail de percement du tunnel du mont Cenis où, ce qui a été prouvé au Gothard plus tard, ses appareils auraient rendu de bien autres services que ces appareils mastodontes appelés béliers compresseurs.

Après cet exposé historique, nous allons examiner le tracé, les conditions géologiques, et l'avancement des travaux.

La galerie a été percée en ligne droite de Bardonnèche à Fourneaux près de Modane. La longueur de cette percée est de 12 220 m. L'altitude du débouché nord à Fourneaux près de Modane est de 1202^m80, l'altitude du débouché sud près de Bardonnèche est de 1335^m38, celle du point culminant dans le milieu du tunnel de 1338^m43.

La partie nord est en rampe de 0^m022 par mètre sur 6110 m. et la partie sud en pente de 0^m0005 par mètre sur 6110 m. Le point le plus élevé de la montagne superposée, soit le sommet du grand Vallon, ou pointe de Fréjus, est à l'altitude de 2949^m18, ce qui fait une épaisseur de 1610^m75 du massif superposé. A ce point-là la température maxima de la roche à l'intérieur a été de 29° 6 centigrades.

Le fond de la vallée de l'Arc à Fourneaux est à 1002^m82, soit à 162 m. au-dessous du débouché du tunnel ; aussi a-t-il fallu faire un grand lacet contournant Modane et se raccorder au tunnel par une galerie en courbe dite, galerie du Replat, d'une longueur de 453^m70 se raccordant avec le tunnel droit à 346^m10 en arrière de la tête. Mais cette galerie, percée dans des terrains glaciaires et des roches déformables, a donné lieu à des déformations continuelles qui avaient entraîné des dépenses de consolidation qui se sont élevées à 410 000 fr.

On fit de 1873 à 1876 une nouvelle galerie se raccordant à 645^m52 en arrière soit à 299^m2 plus en arrière que la première et d'une longueur de 1572^m39. Avec ces galeries la longueur totale du tunnel a été portée à 12 849^m22. La compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée dépensa pour cette nouvelle galerie 4 393 000 fr., sans les frais généraux. Du côté de Bardonnèche aussi il y a une galerie de raccordement en courbe.

C'est par la loi du 17 août 1857 que le gouvernement sarde fut autorisé à entreprendre les travaux de ce percement évalué d'abord à 41 400 000 fr., dont 14 500 000 fr. pour les 36 km. de la ligne d'accès sud.

La compagnie du chemin de fer Victor-Emmanuel qui avait alors la concession du Rhône au mont Cenis, soit de Culoz à Modane, et de Suze à Turin et de Turin au Tessin, près de Novarre devait y contribuer pour 20 millions. Après la cession de la Savoie et de Nice à la France, le coût du tunnel fut évalué à 58 millions et la durée de la construction à vingt-cinq ans. La France s'engagea à y contribuer pour 20 millions et une prime de 500 000 fr. par chaque année gagnée jusqu'à quinze ans, et de 600 000 fr. pour celles gagnées en dessous de quinze ans.

Les travaux furent commencés en régie par l'Etat sarde, le 31 août 1857 du côté de Modane et le 14 novembre 1857 du

côté de Bardonnèche, l'excavation se faisant d'abord à la main. L'excavation mécanique fut commencée du côté de Bardonnèche le 12 janvier 1861. A ce moment l'avancement de la galerie de direction était de 724^m85. Elle fut également commencée du côté de Modane le 25 janvier 1863. A ce moment-là l'avancement de la galerie était de 920^m75. Le 25 décembre 1870 eut lieu la rencontre des deux galeries. A ce moment-là la longueur percée du côté de Modane était de 5153^m50 et du côté du Bardonnèche de 7080^m25. La déviation de direction au moment de la rencontre ne dépassait guère 0^m30. — Voici le tableau des avancements annuels :

Côté de Bardonnèche.

ANNÉES	AVANCEMENT TOTAL DE LA GALERIE A LA FIN DE L'ANNÉE	AVANCEMENT DE LA GALERIE PENDANT L'ANNÉE	AVANCEMENT MOYEN PAR JOURNÉE DE 24 HEURES
	Mètres	Mètres	Mètres
1857 ^a	19.28	19.28	0.425
1858	284.85	265.57	0.73
1859	520.85	236	0.645
1860	724.85	204	0.563
1861 ^b	894.85	170	0.468
1862	1275.25	380.40	1.05
1863	1707.25	432	1.18
1864	2322.95	615.70	1.68
1865	3137.75	814.80	2.23
1866	3900.45	762.70	2.10
1867	4724.75	824.35	2.26
1868	5211.35	486.60	1.34
1869	6192.15	980.80	2.70
1870 ^c	7080.25	988.10	2.77
	Moyenne générale	541.65	1.51

^a Commencé le 14 novembre.

^b Commencement de la perforation mécanique le 12 janvier.

^c Rencontre des galeries le 25 décembre.

Côté de Modane.

ANNÉES	AVANCEMENT TOTAL DE LA GALERIE A LA FIN DE L'ANNÉE	AVANCEMENT DE LA GALERIE PENDANT L'ANNÉE	AVANCEMENT MOYEN PAR JOURNÉE DE 24 HEURES
	Mètres	Mètres	Mètres
1857 ^a	10.80	10.80	0.088
1858	212.75	201.95	0.553
1859	342.75	130	0.359
1860	484.75	142	0.390
1861	677.75	193	0.532
1862	920.75	243	0.667
1863 ^b	1290.75	370	1.050
1864	1763.40	472.65	1.300
1865	2221.80	458.40	1.265
1866 ^c	2434.09	201.29	0.563
1867	3121.90	787.81	2.175
1868	3803.45	681.55	1.895
1869	4406.20	602.75	1.645
1870 ^d	5153.30	747.10	2.080
	Moyenne générale	384.19	1.085

^a Commencement de la perforation le 22 août.

^b Commencement de la perforation mécanique le 25 janvier.

^c Rencontre d'une couche de quartzite de 220 m.

^d Rencontre des galeries le 25 décembre.

A l'exception de la couche de quartzite blanc compacte de 220 m. rencontrée en 1866, les roches étaient peu dures ; sur le versant italien du côté de Bardonnèche on rencontra le *terrain des caschistes* jusqu'au col de l'Arionda, sur une longueur de 5136 m., puis le *terrain des calcaires massifs et gypseux*, caractérisés par la présence de la dolomie, de l'albite et de la corneule, traversé sur une longueur de 4640 m., le *terrain des quartzites*, dont nous avons parlé ci-dessus, sur une longueur de 220 m., et enfin, sur le versant du côté de Modane, le *terrain anthracitifère supérieur* : schistes gris noirâtres pailletés de mica avec couches nombreuses, et parfois puissantes, d'anthracite avec quelques rognons quartzueux et traversé sur une longueur de 1137 m. Les infiltrations d'eau ont été très peu abondantes, il fallut même transporter de l'eau au fond de la galerie pour l'alimentation des ouvriers.

La constitution géologique avait été très bien prévue par M. de Sismonda ; les renseignements que nous donnons ci-dessus sont empruntés à un travail de M. Lachat, ingénieur en chef des mines, à Chambéry.

Le tunnel fut complètement achevé et livré à l'Etat le 15 septembre 1871 ; la locomotive le franchit pour la première fois le 27 août 1871 ; l'inauguration solennelle eut lieu le 17 septembre 1871. Depuis le commencement des travaux jusqu'à l'achèvement complet, il s'écoula donc quatorze ans.

On n'a que peu de renseignements au sujet du coût de ce tunnel. On sait qu'à l'origine les travaux furent commencés en régie, on estime à 3 400 000 fr. les installations mécaniques faites pendant cette période : béliers compresseurs, pompes, bâtiments, captage d'eau et conduites d'air.

En 1867, à la demande de MM. Sommeiller, Grandis et Grattoni, ceux-ci furent chargés de continuer le travail à l'entreprise et moyennant une série de prix. Un projet de contrat fut dressé par une commission du conseil général des travaux publics qui eut pour mission, d'abord de rechercher le prix de revient par unité des travaux exécutés jusqu'ici sans les installations mécaniques et d'en déduire les prix à appliquer à l'avenir. Le rapport à l'appui de ce projet, daté du 9 octobre 1866, est signé par MM. A. Colli, rapporteur ; J. G. Carbonnazzi et J. A. Valvassori, tous trois inspecteurs généraux du génie civil. Le coût était établi à 3978 fr. 15 par mètre courant de tunnel fini pour le côté de Bardonnèche ; à 5766 fr. 56 pour le côté de Modane ; à 4872 fr. 40 pour la moyenne des deux côtés, non compris les installations, le ballastage et la voie de fer. Ils estimèrent aussi l'augmentation de dépenses inhérentes à l'avancement à 150 fr. par mètre courant. La convention fut arrêtée le 11 décembre 1867 entre M. Contelli alors ministre des travaux publics et MM. Grattoni et Sommeiller.

Le prix du tunnel achevé, sans la voie et le ballastage et non compris les installations mécaniques déjà payées, était compté à 4860 fr. le mètre courant. La galerie de raccordement du côté de Modane d'une longueur de 453^m70 à forfait à 1 297 000 fr.

Nous avons dit plus haut que la compagnie P.-L.-M., avait dépensé 410 000 fr. pour consolider cette galerie et qu'en 1873-1876 elle avait de nouveau dépensé 4 393 000 fr. pour en reconstruire une autre de 1572^m39 de long¹, et 170 000 fr. pour l'a-

¹ Voir au sujet de cette galerie de prolongement la description qu'en a donnée M. Jules Michel, ingénieur en chef de la compagnie de

chèvement de la galerie de raccordement du côté de Bardonnèche.

En groupant tous ces renseignements et en faisant la part des frais généraux, mais sans tenir compte des intérêts des capitaux engagés on voit que ce tunnel a coûté 75 500 000 fr., soit par mètre courant,

$$\frac{75\,500\,000}{12\,849\,92} = 5875 \text{ fr. } 52 \text{ par mètre.}$$

Nous renvoyons ceux qui désireraient plus de détails aux sources ci-après :

1° *Conte*, ingénieur en chef des ponts et chaussées. Rapport sur le percement du grand tunnel des Alpes. Annales des ponts et chaussées, 1863, 1^{er} semestre, p. 1 à 51.

2° *A. Deviller*. Des travaux de percement du tunnel sous les Alpes. Paris, E. Lacroix, 1863.

3° *Maxime Hélène*. Les nouvelles routes du globe. Paris, G. Masson, 1885, p. 226-247.

4° *Louis Figuier*. Les nouvelles conquêtes de la science. Grands tunnels et railways métropolitains, p. 1 à 338. Paris, Marpon et Flammarion, 1885.

Saint-Gothard.

Les prolégomènes de l'entreprise du percement du Gothard sont trop connus dans notre pays pour que j'aie besoin de m'étendre longuement à leur sujet, aussi me bornerai-je à un court exposé.

Dans le commencement de l'année 1860, le comité ou Union du Gothard, qui s'occupait de la réalisation de ce passage, fit faire des études par MM. Beck et Gerwig, ingénieurs ; études qui eurent pour base les projets de M. l'ingénieur Wetli. MM. Stoll, Schmidlin et Koller étudièrent la question au point de vue commercial.

Leurs remarquables rapports furent publiés en 1865. Au mois d'avril 1869, les Etats intéressés : l'Italie, la Confédération de l'Allemagne du nord et le grand-duché de Bade, informèrent le Conseil fédéral de leur intention de s'intéresser à ce passage. C'est la même année que les concessions furent accordées par les cantons suisses et ratifiées par l'Assemblée fédérale le 22 octobre 1869.

Des conférences internationales eurent lieu du 15 septembre au 15 octobre 1869 et aboutirent à un traité international avec l'Italie, auquel la Confédération de l'Allemagne du nord adhéra le 20 juin 1870 et l'empire allemand le 28 octobre 1871. Ces traités formèrent la base fondamentale de l'entreprise. La compagnie du Gothard fut constituée définitivement le 6 décembre 1871 au capital de 187 millions, dont 85 millions de subventions, 34 millions d'actions et 68 millions d'obligations. Cette compagnie appela M. Rob. Gerwig en qualité d'ingénieur en chef.

Le tunnel du Gothard, seul objet qui nous occupera ici, dont le tracé fut adopté en 1869, a une longueur de 14 984^m19 entre Göschenen et Airolo. Son portail nord à Göschenen est à l'altitude de 1109 m. ; le point culminant à 1154^m39 et le portail sud à Airolo à 1144^m30. A partir de la tête nord, il y a une rampe de 5,82 ‰ sur 7822 m., un palier central de 319 m., P.-L.-M., dans le numéro de juin 1881 de la *Revue générale des chemins de fer*.

une pente de 0,5 ‰ sur 2273 m. suivie d'une pente de 2 ‰ sur 3793 m. et d'une pente de 1 ‰ sur 972 m.

Les travaux de ce tunnel furent mis en adjudication le 5 avril 1872. Il ne resta en présence, sur sept concurrents, que deux : M. Louis Favre et la Société italienne des travaux publics, à la tête de laquelle se trouvaient les anciens ingénieurs qui avaient dirigé le percement du mont Cenis. La préférence fut accordée à M. Louis Favre avec lequel un traité fut conclu le 7 août 1872.

D'après cette convention le prix à forfait pour l'excavation complète du tunnel y compris l'aqueduc et les niches était payé à 2800 fr. le mètre courant, et les maçonneries de revêtement aux prix suivants : le mètre cube de maçonnerie de voûte en pierre d'appareil ou moellons piqués au smillés, 75 fr. ; plus, par mètre carré de parement de ces maçonneries, 20 fr. ; le mètre cube de maçonnerie ordinaire, 40 fr. ; le mètre courant de ballastage pour deux voies, 22 fr., et le mètre courant de pose de voie (matériel fourni par la compagnie), 4 fr.

La galerie de raccordement en courbe du côté d'Airolo, longue de 165 m. était payée à 1500 fr. le mètre courant revêtue en maçonnerie ordinaire.

Le prix à forfait de 2800 fr. pour l'excavation comprenait la fourniture de toutes les installations mécaniques qui étaient à la charge de l'entreprise et pour lesquelles la compagnie lui faisait les avances que l'entrepreneur devait lui rembourser avant la fin des travaux. Ces avances ont été limitées, par une convention postérieure, à 4 millions. Les comptes de l'entreprise fournissent les renseignements donnés à la page suivante sur les dépenses faites pour outillage et installations.

Si l'on en excepte les Nos 6 à 11, qui constituent l'outillage de l'entreprise et ne font pas partie des installations, on a un total de 4355 547 fr. 52 cent.

C'est là le chiffre qui peut être comparé avec ceux que nous donnons d'autre part pour les tunnels du mont Cenis et de l'Arlberg.

1. Immeubles	Fr. 1 034 182 79
2. Conduites et prises d'eau	» 1 524 225 58
3. Terrains	» 127 363 49
4. Machines fixes	» 1 550 953 04
5. » outils	» 118 827 62
6. Matériel roulant	» 744 578 36
7. Outils et engins	» 265 582 02
8. Voie et matériel fixe	» 499 934 91
9. Ecuries et chevaux	» 107 588 91
10. Mobilier	» 63 261 78
11. Perforatrices et affûts	» 583 020 82
Total,	Fr. 6 619 514 32

La durée de l'exécution était fixée à huit ans dès l'approbation de la convention par le Conseil fédéral ; par une convention complémentaire, la date à partir de laquelle compte ce délai de huit ans a été admise au 1^{er} octobre 1882, le tunnel devait donc être entièrement achevé le 1^{er} octobre 1880. Les retards donnaient lieu à une amende de 5000 fr. par chaque jour jusqu'à six mois et à 10 000 fr. par jour à partir du sixième mois. Si le retard dépassait l'année, la compagnie pouvait déposséder l'entrepreneur de son cautionnement de huit

millions de francs et résilier le contrat concernant les travaux.

L'entrepreneur recevait une prime de 5000 fr. par chaque jour gagné sur le délai stipulé.

D'après le cahier des charges, les prix à forfait stipulés comprenaient toutes les chances auxquelles est exposé l'entrepreneur par suite d'événements ou de difficultés imprévues qui pouvaient se présenter durant l'exécution des travaux, par suite de la configuration ou de la nature des terrains, de l'affluence extraordinaire des eaux, des phénomènes atmosphériques ou de tout autre cause quelconque. C'est ce qui a été invoqué pour repousser ses demandes d'augmentation en vue des difficultés causées par la grande chaleur, demandes qui n'ont pas été admises par le tribunal arbitral.

Le devis qui accompagnait cette convention et s'élève à 47 804 300 fr., ne prévoyait le revêtement en maçonnerie que sur un tiers de la longueur du tunnel. Comme on le verra plus loin, ce revêtement a été fait sur toute la longueur.

Les travaux préliminaires furent commencés en régie par la compagnie dans les mois de juin et juillet 1872 par l'ouverture des tranchées d'accès. L'entreprise Favre attaqua les travaux de percement proprement dits le 13 septembre 1872 pour le chantier sud (Airolo) et le 24 septembre 1872 pour le chantier nord (Göschenen). La perforation mécanique a commencé le 4 août 1873 du côté nord et le 1^{er} juillet 1873 du côté sud et a remplacé, dès cette époque le forage à la main.

Le système adopté était la méthode belge avec la galerie d'avancement au sommet, suivie de l'élargissement pour la calotte de la voûte, du creusement de la cunette du stross et de son élargissement pour opérer le déblai du stross et des pieds-droits. On était obligé d'établir des rampes d'accès pour relier avec la galerie d'avancement, qui était au niveau supérieur, les parties du tunnel qui étaient terminées ; ces rampes d'accès devaient être fréquemment déplacées au fur et à mesure de l'avancement des travaux, c'est ce qui a été signalé comme un des grands inconvénients que présentait cette méthode, comparée à celle de la galerie d'avancement à la base comme on l'avait pratiquée au tunnel du mont Cenis et plus tard à celui de l'Arlberg. D'autres inconvénients consistaient en ce que la voûte devait attendre longtemps et être reprise en sous-œuvre avant de reposer sur ses pieds-droits, ce qui était surtout fâcheux quand on traversait des roches sujettes à déformation. Enfin un autre inconvénient majeur relevé contre cette méthode c'est la grande longueur sur laquelle les différents chantiers d'achèvement sont échelonnés en arrière du front d'attaque de la galerie d'avancement ; longueur qui doit être de 2800 m. et a dépassé même 3000 m. A ce sujet nous renvoyons au remarquable travail publié en 1883 par M. Gustave Bridel, ingénieur en chef de la Compagnie du Gothard, « Examen critique des systèmes d'exécution appliqués à la construction rapide des grands tunnels, » que nous avons analysé ici, et à une note publiée dans la *Revue générale des chemins de fer* par M. Jules Michel, ingénieur en chef à la Compagnie P.-L.-M., en juin 1881, sur la galerie de prolongement du mont Cenis où ces deux systèmes sont discutés.

Les expériences faites au tunnel du mont Cenis ne rendaient pas douteux le choix de l'emploi de l'air comprimé pour actionner les perforatrices. M. le professeur Daniel Colladon,

célèbre ingénieur et physicien qui, nous l'avons dit plus haut, avait eu en 1852 le premier l'idée de cette application pour le mont Cenis, fut appelé comme ingénieur-conseil de l'entreprise Favre; il proposa des systèmes de compresseurs beaucoup plus simples et d'un fonctionnement bien supérieur à ceux employés au mont Cenis, et pour lesquels il avait pris un brevet en 1871, système qui a été aussi employé pour la compression du gaz d'éclairage et spécialement dans ses applications à l'éclairage des voitures de chemin de fer. Ces pompes ou compresseurs étaient actionnés par des turbines système Girard, de 200 chevaux chacune, marchant à 350 tours par minute, les pompes elles-mêmes faisant 80 révolutions dans le même temps et actionnées en groupe de trois par une turbine. On en établit cinq groupes de chaque côté. Chaque groupe pouvait refouler par heure dans le tunnel 1000 m³ d'air comprimé à 7 ou 8 atmosphères, dans des tubes en fonte de 20 cm. de diamètre.

Ces compresseurs furent construits par les maisons Escher, Wyss et C^{ie} à Zurich, B. Roy et C^{ie} à Vevey, et par la Société genevoise de constructions mécaniques à Genève. Pour combattre l'échauffement de l'air par la compression, M. Colladon faisait parcourir l'intérieur du piston et sa tige par un courant d'eau froide, cette disposition était complétée par une injection d'eau froide et pulvérisée dans les cylindres.

Il ne fut prise aucune disposition spéciale pour la ventilation ou l'aération du tunnel, c'est-à-dire pour combattre les causes qui vicient l'air soit la présence des ouvriers et des chevaux et leur respiration, le produit de la combustion des lampes et des gaz de l'explosion des mines. On avait compté que l'air comprimé s'échappant des perforatrices serait suffisant. On avait bien ménagé sur la conduite principale des robinets d'aéragé. Ce mode d'aération se montra insuffisant, en raison de la grande longueur sur laquelle étaient disséminés les chantiers, les bouches d'air étaient insuffisantes, et les ouvriers se procuraient de l'air en donnant des coups de pioche dans la conduite, ce qui faisait baisser la pression et nuisait à la perforation, surtout quand, comme cela arrivait du côté d'Airolo en hiver, on manquait de force motrice, les étranglements du profil sur ces chantiers nuisaient au libre écoulement de l'air. C'est surtout l'étranglement dans la mauvaise partie à 2800 m. de la tête nord et dont nous reparlerons, qui gêna beaucoup la libre circulation de l'air.

On installa bien des appareils d'aspiration formés de cloches comme celles qui servent dans les usines à gaz pour l'extraction du gaz des cornues, ces cloches furent installées à chaque tête, mais on ne s'en servit pas à cause de la difficulté de placer et de maintenir les tuyaux de 1^m20 de diamètre qui, depuis ces cloches, devaient suivre le sommet de la voûte; difficulté provenant précisément des étranglements de profils par suite de la longueur de l'échelonnement des chantiers en arrière du front d'attaque, et principalement du côté nord par l'étranglement de la partie située à 2800 m.

Comme force motrice on a employé du côté de Göschenen les eaux de la Reuss, dont la pente est très forte dans la vallée des Schöllenen immédiatement au-dessus, et le volume d'eau en toute saison suffisant, aussi de ce côté la force motrice a-t-elle été toujours suffisamment abondante. Il n'en a pas été de même du côté d'Airolo, où l'on a d'abord été amené à utiliser

la Tremola qui prend sa source au lac de Sella près de l'hospice du Saint-Gothard et avec une hauteur de chute de 180 m. ou 18 atmosphères, mais l'on ne tarda pas à observer que le débit de ce cours d'eau était insuffisant puisque dans les jours de froids excessifs en hiver, le débit en descendait à 100 litres par seconde. Aussi en 1874 M. Favre dut-il se décider à faire une nouvelle prise d'eau dans le Tessin, mais comme ce torrent n'a qu'une pente de cinq pour mille au-dessus d'Airolo, il fallut la pousser jusqu'à une distance de 3400 m., au moyen d'une conduite en bois pouvant débiter 1 m³, conduite en partie enterrée dans le sol, ou appuyée contre les flancs à pic de la vallée, au travers de gorges profondes sur des viaducs ou estacades en charpente. Cette dérivation avait une chute de 90 mètres. Chacune d'elles aboutissait à des réservoirs dépotoirs. Cette dernière conduite fut exposée fréquemment à des interruptions par des avalanches ou des chutes de blocs de rochers, de sorte que, malgré ces grands frais, l'installation des forces motrices du côté d'Airolo a été inférieure à ce qu'elle était du côté de Göschenen, et que souvent, en hiver, on manquait de force motrice, alors la perforation se ralentissait et la ventilation devenait tout à fait insuffisante, inconvénient qui devint surtout sérieux quand on aborda les parties à température élevée.

Quant au matériel pour la perforation, M. Favre avait été obligé, par son contrat, de racheter une partie du matériel qui avait été utilisé au percement du mont Cenis et parmi lequel se trouvaient un assez grand nombre de perforatrices Sommeiller, mais celles-ci ne furent pour ainsi dire pas employées, M. Favre ayant fait l'essai des perforatrices Dubois et François et Mac-Kean qui donnaient de meilleurs résultats. Cette dernière fut considérablement perfectionnée par M. Séguin, chef des ateliers à Airolo. M. Ferroux, de son côté, ancien chef des ateliers du mont Cenis à Modane, qui entra dans les mêmes fonctions à l'entreprise Favre, pour le côté de Göschenen, construisit aussi une perforatrice qui rendit les meilleurs services et qui, avec celle de Mac-Kean-Séguin, et une perforatrice imaginée par MM. Colladon et Turrettini et construite dans les ateliers de la Société genevoise de construction, furent employées à la perforation pendant toute la durée des travaux.

Il fut percé 251 239 coups de mine (nord, 137 794, sud, 113 505) avec une profondeur totale de 295 745 m., soit une profondeur moyenne de 1^m18. La consommation moyenne de dynamite a été de 21,6 kg par mètre courant de galerie de direction.

Enfin en fait d'installations ajoutons que l'air comprimé fut aussi appliqué au transport des déblais, outils et matériaux pour boisages et maçonneries. On y affecta d'abord une ancienne locomotive à vapeur transformée pour cet usage, un réservoir à air de 16 m³ placé sur un truc suivait la locomotive, et l'on y employait seulement l'air comprimé pour la perforation. Plus tard on fit confectionner au Creusot une locomotive spéciale avec un réservoir de 7 m³ à 14 atmosphères. Huit compresseurs spéciaux construits par la Société genevoise d'après le système Colladon, comprimaient à 14 atmosphères l'air déjà comprimé à 6 ou 7 atmosphères. Ils produisaient chacun 12 m³ par minute sans réchauffement appréciable. On avait posé sur le sol, dans le tunnel, de grands réservoirs contenant 50 m³ d'air comprimé à 14 atmosphères et permettant de

renouveler la provision d'air de la locomotive comme on renouvelle l'eau d'une locomotive à vapeur. La distribution de l'air comprimé était réglée par un appareil automatique inventé par M. Ribourt, ingénieur de l'entreprise Favre. On a aussi employé l'air comprimé pour actionner des pompes d'épuisement utilisées dans les parties à fortes venues d'eau du côté sud, et pour actionner des élévateurs pour racheter les différences de niveau de la galerie d'avancement avec les autres chantiers. Ces élévateurs, peu pratiques, ont été abandonnés, et on est revenu aux plans inclinés.

Pour la description détaillée des installations mécaniques nous renvoyons à ce qui a été inséré dans les rapports trimestriels publiés par le Conseil fédéral ainsi qu'à l'ouvrage dont nous avons déjà parlé : *Les nouvelles conquêtes de la science*, par L. Figuié, pages 252-284.

Quant à la nature des roches traversées, nous devons pour leur description renvoyer aussi à la publication du Conseil fédéral ci-dessus citée, dont une annexe donnait les travaux complets de M. le Dr Stapff, géologue de la Compagnie.

D'une manière générale on a rencontré, en partant de l'embouchure nord : sur 4200 m. le gneiss-granit homogène du massif du Finsteraarhorn, puis 350 m. de gneiss schisteux, 130 m. de roche calcaire cristallin micacé, 870 schistes noirâtre lustré et micacé, schistes cristallins et micacés, amphibolitiques, passant quelquefois au gneiss, 1890 m. gneiss schisteux avec rognons de quartz et enfin 2910 m. micaschistes en grande partie granatifères et amphibolitiques et 620 m. de schiste où les grenats prédominent. La forme des couches était généralement en éventail. Les infiltrations d'eau ont été très abondantes du côté sud ou d'Airolo où elles ont atteint en 1874 jusqu'à 271 litres par seconde. La plus grande hauteur du massif superposé était le Kastelhorngrat altitude 2861 m. soit une hauteur superposée de 2861 - 1154 = 1717 m.

Le maximum de la chaleur rencontrée dans l'intérieur a été de 30,8° (température de la roche) sous l'Aelpligrat dont l'altitude est de 2832 m. et à une distance de 7200 m. de la tête nord, la température maximum de l'air dans le tunnel a été de 33°. Nous rappelons qu'au tunnel du mont Cenis la température maxima de la roche a été de 29,6°.

Côté de Göschenen.

ANNÉES	AVANCEMENT TOTAL DE LA GALERIE A LA FIN DE L'ANNÉE	AVANCEMENT DE LA GALERIE PENDANT L'ANNÉE	AVANCEMENT MOYEN PAR JOURNÉE DE 24 HEURES
	Mètres	Mètres	Mètres
1872 ^a	18.9	18.9	0.281
1873 ^b	600.20	581.30	1.319
1874	1637.30	1037.10	2.841
1875	2810.80	1173.50	3.215
1876	3816.50	1005.70	2.755
1877	5046	1230.50	3.371
1878	6350	1309	3.586
1879	7527	1177	3.225
1880 ^c	7738.70	211.70	3.528
	Moyenne générale	1050.463	2.882

^a Commencé le 24 octobre. Perforation à la main.

^b Commencement de la perforation mécanique le 4 avril. Il a été foré à la main 88m70. — ^c Rencontre des galeries le 29 février.

Côté d'Airolo.

ANNÉES	AVANCEMENT TOTAL DE LA GALERIE A LA FIN DE L'ANNÉE	AVANCEMENT DE LA GALERIE PENDANT L'ANNÉE	AVANCEMENT MOYEN PAR JOURNÉE DE 24 HEURES
	Mètres	Mètres	Mètres
1872 ^a	101.70	101.70	0.933
1873 ^b	593	491.30	1.346
1874	1340.40	747.40	2.048
1875	2596	1255.60	3.440
1876	3616.60	1020.60	2.797
1877	4610.60	994	2.723
1878	5910.50	1229.90	3.369
1879	7069	1158.50	3.174
1880 ^c	7134.70	165.70	2.762
	Moyenne générale	931.242	2.592

^a Commencé le 10 septembre. Perforation à la main.

^b 1^{er} juillet. Commencement de la perforation mécanique. Il a été foré à la main 219m20. — ^c Rencontre des galeries le 29 février.

Dans le rapport trimestriel N° 30 du Conseil fédéral d'avril 1880, il a été publié un rapport et un tableau graphique complet des observations de température par M. le Dr Stapff, géologue de la Compagnie, travail auquel nous renvoyons.

(A suivre.)

NIVEAU DES EAUX DES LACS DU JURA

Les riverains des lacs de Neuchâtel, de Morat et de Bienne ayant souffert des crues de cette année, l'opinion publique s'est émue et l'on a prétendu que les hautes eaux étaient aussi élevées maintenant qu'avant les grands travaux de la correction des eaux du Jura.

Le département fédéral de l'intérieur a adressé à ce sujet un rapport au Conseil fédéral, dont nous extrayons les renseignements suivants :

Voici l'altitude des hautes eaux des lacs à diverses époques :

	Morat.	Neuchâtel.	Bienne.
Moyenne des maxima annuels de 1856-67.	—	—	434,99
Maximum de 1867	436,44	436,42	435,72
Niveau prévu au projet La Nicca-Bridel	435,17	434,95	433,97
Moyenne des maxima annuels de 1878-88	433,80	433,42	433,11
Maximum en 1883	—	—	433,79
Maximum en 1888	433,74	433,73	433,59

Ces cotes sont rapportées au repère Pierre à Niton = 376,86

On voit d'après cela que les niveaux des plus hautes eaux prévus par le projet de correction n'ont pas été atteints, même pour le lac de Bienne qui s'en est approché de 0m48. Pour les deux autres lacs la différence est bien plus grande encore puisqu'elle est de 1m43 et 1m22.

Le rapport attribue les réclamations qui se sont élevées à propos de la crue de 1888, au fait qu'on a utilisé pour certaines cultures des parties du rivage qui étaient autrefois sous l'eau même à l'étiage et qui n'étaient pas destinées à être définitivement exondées d'après le projet de correction.

Rédaction.