Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Band: 26 (1890-1891)

Heft: 102

Artikel: De la chaleur centrale dans l'intérieur des massifs, des difficultés qu'elle occasionne pour les grands percements alpins et des moyens d'atténuer ces difficultés

Autor: Meyer, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-262541

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: 02.07.2025

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

DE LA CHALEUR CENTRALE

dans l'intérieur des massifs, des difficultés qu'elle occasionne pour les grands percements alpins et des moyens d'atténuer ces difficultés,

par **J. MEYER,** ingénieur en chef du Jura-Simplon.

Cette question n'est pas nouvelle pour la Société vaudoise des Sciences naturelles; elle a fait l'objet d'un remarquable travail de M. le professeur Renevier, inséré dans le volume XIX, n° 89 de notre Bulletin de 1883, sur lequel je reviendrai.

Voyons un peu comment elle a été traitée dans les ouvrages géologiques.

I. Dès 1830 à 1845, Arago aborda cette question dans le IIIe volume de ses notes scientifiques, à propos des puits artésiens.

II. Bernhard Studer l'effleura aussi dans un rapport publié en 1848.

III. *Carl Vogt,* Lehrbuch der Geologie und Paleontologie. 2e édition, 1854, Brunswick, Vieweg, lui consacre un chapitre; il cite surtout les travaux de Cordier, Despretz, Fournier en France, et du professeur Reich à Freiberg. Il donne quelques idées sur la forme des lignes *chtonisothermes* reliant, à l'intérieur de la terre, les points de même température. Il insiste sur l'influence de la chaleur spécifique des roches sur le degré d'accroissement de la température, sur laquelle nous reviendrons. Il cite aussi les expériences de El. de Beaumont, de Poisson et de Bischoff.

IV. *Dr Karl Naumann.* Lehrbuch der Geognosie, 2e édition. Leipzig, Engelmann, 1858. Cet ouvrage a un chapitre important sur ce sujet; c'est le IIIe : *Temperatur der Erdrinde ou Geothermik.* Il y cite l'ouvrage de Bischoff, publié à Leipzig en 1837 : *Die Wärmelehre des Inneren unseres Erdkörpers,* et ses essais sur le refroidissement d'une sphère de basalte ; les travaux de Cordier de 1823 : *Essais sur la température intérieure de la terre;* les essais faits en 1760 par *Gensonne* à Giromagny. Il cite

également ceux de H.-B. de Saussure aux salines de Bex; de *Al. de Humboldt* à Mexico; du prof. *Reich*, à Freiberg; de *Fox* et *Oath*, en Cornouailles, relatés par *de la Bèche;* de *Mattenucci* et *Pilla*, à *Montemassi en Toscane;* les observations faites à *Jakusk*, en Sibérie, dans les forages de puits, relatées par *Meidendoff;* de *Forbes*, près d'Edimburgh; de *Magnus;* de *Walfredin*, etc. Il admet une relation des courbes *chtonisothermes* avec le relief extérieur des massifs.

Il donne une formule pour calculer la température par rapport à la profondeur verticale et à la plus courte distance à la surface.

V. *A. de Lapparent. Traité de Géologie.* Paris, Savy, 1883. C'est l'ouvrage didactique qui traite le plus complètement cette question, dans le livre III: *Dynamique terrestre interne*, et plus spécialement dans le chapitre Ier : *Chaleur interne ou géothermique.* Il analyse encore, plus complètement que ne l'ont fait les auteurs précédemment cités, les observations faites sur cette question et les auteurs qui l'ont traitée; il parle notamment des travaux plus récents et des observations de *Dunker*, à Freiberg, sur le forage du puits de *Sparenberg*, de la formule qu'il a proposée sur les percements des tunnels alpins du Cenis et du Gothard, et des travaux de M. Stapff, sur lesquels nous reviendrons.

Il admet l'augmentation de la température avec la profondeur, *mais suit-elle une loi capricieuse, ou peut-elle se traduire par une formule?*

Il critique l'idée de *Dunker* et de *Stapff* de vouloir appliquer à cette question la méthode des moindres carrés pour établir une formule avec beaucoup de décimales, et il admet en somme avec Arago (expérience du puits de Grenelle) que *le degré géothermique*, c'est-à-dire la profondeur pour laquelle la température intérieure augmente d'un degré, croît avec la profondeur.

Il estime qu'entre 1000 et 3000 m. d'altitude le degré géothermique ne dépasse pas 30^m^, de 1000 m. au niveau de la mer de 31 à 32^m^.

Il donne quelques considérations générales sur l'allure des courbes, qu'il appelle *Isogéothermes* (au lieu de *Chtonisothermes*, comme ses prédécesseurs les appelaient), par rapport au relief de la surface, les aspérités accusées par les accidents de la surface s'atténuant d'une courbe à l'autre dans la profondeur,

comme dans le figuré des eaux, mers et lacs, dans le dessin des cartes.

VI. *M. E. Dunker*, conseiller supérieur des mines, à Halle, a publié dans le *Jahrbuch für Mineralogie*, Ier vol. 1889, le résultat des observations de température au sondage de Schladebach près de Durrenberg en Saxe. Ce sondage a atteint une profondeur de 1716 m. et on y a constaté au fond une température de 45°3 Réaumur (56°7 centig.) ; la température à la surface était de 8° Réaumur (10° centigr.), soit une augmentation de 46°7 C., ou un degré géothermique moyen de

$$\frac{1716}{46^{\circ}7} = 36^{m}7$$

VII. Parmi les travaux spéciaux à cette question, citons en première ligne ceux de M. le Dr *Stapff, ingénieur, géologue du Gothard*, publiés en 1879 et 1880 dans la Revue universelle des mines de Cuyper (Liège et Paris), et intitulés : *Etude de l'influence de la chaleur intérieure de la terre sur la possibilité de construction des tunnels dans les hautes montagnes.*

M. Stapff avait fait de nombreuses observations au Gothard pour déterminer la température de l'air et de la roche à l'intérieur du tunnel et pour déterminer la température moyenne annuelle des points de surface d'après leur altitude.

En appliquant la méthode des moindres carrés à ces nombreuses observations faites, il établit des formules pour déterminer l'accroissement de la température intérieure sur la température moyenne à la surface en fonction de la profondeur verticale et de la plus courte distance à la surface.

Ces formules, après toutes les simplifications apportées, sont les suivantes: δ étant l'accroissement de la température sur la température moyenne à la surface ; h la profondeur verticale ; n la plus courte distance à la surface.

$$\text{I } \delta = 0.02079\ h$$
$$\text{II } \delta = 0.02159\ h.$$

Je partage l'avis de M. de Lapparent au sujet de ces formules et de celles que M. Dunker a formulées aussi, c'est que l'accroissement de chaleur ou la valeur du degré géothermique ne dépend pas uniquement de la forme extérieure du massif ou des considérations plastiques, mais aussi de la chaleur spécifique ou

de la conductibilité des couches qui forment ces massifs, et dans une certaine mesure aussi de la forme de la stratification, celle-ci influant sur le refroidissement. Il y a là des éléments d'incertitude qui font qu'on ne peut pas serrer la question de si près avec une formule mathématique à un grand nombre de décimales (soit 8 décimales pour les formules dont découlent les formules simplifiées que nous avons citées). Il faut se borner à comparer des conditions qui sont à peu près semblables en ce qui concerne la composition minéralogique des massifs, ce qui est heureusement le cas si l'on compare le Simplon au Gothard, jusqu'à ce que l'on ait fait des essais nombreux et comparatifs sur la conductibilité des diverses roches, essais que nous avons voulu faire, mais pour lesquels nous n'avons pu encore obtenir les crédits nécessaires.

M. Stapff a appliqué sa formule au premier projet du tunnel du Simplon, de 1878, qui passait sous le Monte-Leone et d'une longueur de 18 kilomètres 507 mètres, et il a trouvé qu'on rencontrerait dans l'intérieur de ce tunnel une température de 47° centigrades environ.

Dans la première partie de son travail, il discute beaucoup les conditions physiologiques des travaux souterrains sous l'influence des températures élevées et surtout sur les observations d'un célèbre physiologiste, M. le professeur *Dubois-Raymond,* à Berlin ; enfin il rend compte de nombreuses expériences qu'il a faites à ce sujet d'après les conseils et les directions de ce savant.

Il insiste sur le fait, connu du reste, qu'avec une température élevée, surtout si l'air est très chargé d'humidité, le rendement du travail humain va en diminuant rapidement et il assigne une limite à la possibilité de tout travail humain, limite qu'il fixe à 40° lorsque l'air inspiré par les ouvriers est saturé d'humidité et à 50° s'il est parfaitement sec.

Cette publication de M. le Dr Stapff a donné lieu tout d'abord à un travail inédit, de janvier 1880, de M. *de Stockalper,* ancien ingénieur de l'entreprise *L. Favre et Cie*, du tunnel du Gothard. Il détermine aussi la température probable que l'on rencontrerait dans le tunnel du Simplon d'après le projet de 1878 de cette Compagnie, passant à une altitude de 729m sous le massif du Monte-Leone, qui a lui-même une altitude de 3200m, et trouve, comme M. Stapff, que cette température atteindrait 47°.

Il propose alors un autre tracé coudé passant plus à l'ouest, sous le col du Simplon, et en avant du Schönhorn, pour éviter

ce massif du Monte-Leone. Ce tunnel aurait 20 kilomètres de longueur et serait suivi d'une galerie inclinée de 3200^{m} de longueur débouchant à Algaby. La tête nord serait, dans la gorge de la Saltine, à l'altitude de 711^{m}, le point culminant au milieu à 763^{c}, la tête sud près de Paglino à 755^{m}. L'altitude du massif dominant serait, sous le Schönhorn, de 2700^{m}, sous le Kessihorn, de 2825^{m} et la température maxima que l'on rencontrerait de 36^{c}.

IX. Dans une conférence faite le 13 septembre 1880, par M. *G.-Th. Lommel,* alors directeur de la compagnie du Simplon, à la Société helvétique des sciences naturelles réunie à Brigue, celui-ci, tout en contestant les théories et les calculs de M. Stapff, propose cependant de déplacer le tracé du tunnel, de le reporter plus à l'est pour le dégager du puissant et haut massif du Monte-Leone et pour bénéficier des évidements de la haute vallée de la Saltine et de la Cherasca (alpe Di Veglia). Enfin il indique un certain nombre de tracés, dont ceux choisis en 1882 par la Compagnie de la Suisse Occidentale-Simplon se rapprochent beaucoup.

X. Ici viennent se placer un travail très complet sur cette question, et resté inédit, de M. *X. Imfeld,* ingénieur (1882), et un premier rapport de M. le professeur *Heim,* de Zurich (novembre 1882), également inédit, qui, tous deux, au sujet des prévisions de température, arrivent aux mêmes résultats que le deuxième rapport d'expertise géologique et géothermique demandé par la Compagnie de la Suisse Occidentale-Simplon, en *mai 1883*, à MM. les professeurs *Heim, Renevier, Lory* et *Taramelli ;* c'est celui dont j'ai déjà parlé et qui est inséré dans le volume XIX, n° 89, de notre Bulletin, et qui est dû surtout aux deux premiers de ces géologues.

Ces Messieurs ne se sont pas basés sur les formules de M. Stapff, comme l'avaient fait M. Stockalper en 1880 et M. Imfeld en 1882 ; ils sont partis de l'idée que la composition pétrographique des deux massifs du Gothard et du Simplon est sensiblement la même. La chaleur spécifique et la conductibilité des roches sont donc sensiblement les mêmes aussi, et l'on peut ainsi se baser sur la forme plastique des massifs et chercher dans chacun les parties assimilables.

Ils ont cherché, pour chaque forme caractéristique : points saillants, croupes, combes ou fonds de vallée, replats, etc., le coefficient géothermique, c'est-à-dire la profondeur pour laquelle la

température s'accroît de un degré, en étudiant l'allure des courbes isogéothermiques ou chtonisothermes.

Pour leur faciliter ce travail, j'avais fait dresser et mis à leur disposition des profils, en travers, soit du massif du Gothard, soit de ceux du Simplon et du Mont-Cenis, afin qu'ils pussent mieux se rendre compte du relief de ces massifs et apprécier l'influence des évidements latéraux plus exactement que cela n'est possible avec une simple coupe en long sur l'axe du tunnel.

C'est ainsi qu'ils arrivèrent à déterminer la température probable des différents tracés en présence, avec une erreur possible de ± 3° centigrades, et ils en fournissaient le résumé dans le tableau [1] annexé à leur rapport.

1° Tracé de 1878 de la Compagnie du Simplon sous le massif du Monte-Leone, avec tunnel de 18 kilom. 507 m. de long.

± 3°

Température maxima : 47°.5 soit de 50°.5 à 44°.5.

2° Tracé droit des études de 1882 de la Compagnie Suisse Occidentale-Simplon passant à l'est du massif du Monte-Léone, sous le Furggenbaumhorn, avec tunnel d'une longueur de 19 kilomètres 639 mètres.

± 3°

Température maxima : 38° soit de 41° à 35°.

3° Premier tracé coudé des études de 1882 de la Compagnie Suisse Occidentale-Simplon, passant dans la même direction. Longueur : 19 kilom. 795 m.

± 3°

Température maxima : 36°.5 soit de 39°.5 à 33°.5.

4° Deuxième tracé, le plus coudé, de 1882, de la Suisse Occidentale-Simplon, passant sous le col de la Forchetta et l'alpe ou vallon de Campo, avec tunnel de 20 kilom. au plus.

± 3°

Température maxima : 34°.9 soit de 37°.9 à 31°.9.

Rappelons, à titre de comparaison, que la température maxima de la roche observée dans le percement du Gothard avait été de *30°.75*.

[1] Les tableaux annexés à ce rapport ont été présentés à la Société lors de la lecture de ce travail. *(Editeur.)*

Ce troisième tracé, plus coudé, de 20 kilomètres de long, avait été proposé par moi, après une course dans la vallée de la Chérasca et à l'alpe di Veglia ; j'avais reconnu que les anciennes cartes de l'état-major sarde ne donnaient pas une image exacte du relief du terrain et j'avais fait faire un levé topographique complémentaire, à la suite duquel j'ai forcé le coude.

Ces mêmes géologues avaient été chargés aussi d'évaluer la température maxima que l'on pourrait probablement rencontrer dans le percement du Mont-Blanc, qui se posait alors devant les Chambres françaises en concurrent du Simplon. Ils déterminèrent cette *température maxima* à *53° centigrades* ± 3°, soit *de 50 à 56°*.

Cette comparaison des températures du Gothard, du Simplon et du Mont-Blanc a été faite par ces Messieurs, qui l'ont figurée sur un tableau représentant la forme orographique des massifs (du moins en coupe longitudinale), et ce tableau comparatif est annexé à leur rapport ci-dessus cité.

MM. Heim et Renevier ont également fourni à la Compagnie en 1886 et 1887, des études thermiques pour les nouveaux projets de tunnel passant à l'ouest du Monte-Leone et que la Compagnie faisait alors étudier. Ces rapports n'ont pas été publiés.

La température maxima, d'après ces projets, pourrait aller jusqu'à 42° centigrades. Dans l'état actuel des négociations avec l'Italie, ces projets seront très probablement abandonnés et l'on en reviendra aux tracés que j'avais proposés en 1882 et dont je viens de parler.

XI. En 1883, M. *de Stockalper*, ingénieur, ancien chef de service de l'entreprise du tunnel du Gothard, publia une étude intitulée : *Les grands tunnels alpins et la chaleur souterraine.* Lausanne, imprimerie L. Vincent.

Dans différents tableaux il donne, comme déjà dans son travail inédit de 1880, la courbe thermique du Mont-Cenis, où le maximum de température observé aurait été de *29°.5*, avec une épaisseur de massif superposé de 1609^{m}; celle du Gothard, maximum *30°.75*, avec une hauteur de massif superposé de 1685 à 1717^{m} ; puis le projet le plus coudé du Simplon (20 kilomètres), où, avec une hauteur de massif superposé de 2050^{m}, il prévoit une température maxima de *36°*; et, enfin, le tunnel projeté sous le Mont-Blanc, où, avec une hauteur de massif superposé de 3000^{m}, il prévoit une température maxima de *53°*.

Dans ce travail, M. de Stockalper donne de nombreux renseignements sur les inconvénients qu'a présentés au tunnel du Gothard cette température élevée et surtout si humide : maladie des hommes et des chevaux, grande mortalité de ces derniers, diminution considérable du rendement du travail humain, dans ces conditions, et partant renchérissement considérable des travaux exécutés sous l'influence de ces températures élevées.

Pour les hommes, la maladie qui a surtout été aggravée par cette influence de la chaleur humide, était l'*anémie des mineurs*, soit le développement de parasites intestinaux et musculaires, ou de l'*ankylostome duodénal*, comme les médecins l'ont appelé. M. de Stockalper cite à ce sujet les travaux des Drs *Giacone*, *Fodéré*, *Bugnion*, notre collègue, du Dr *H.-C. Lombard*, du Dr *Sonderegger*, etc., etc.

Au moment le plus critique, cette maladie avait atteint le 60 °/₀ des ouvriers occupés.

30 °/₀ légèrement atteints guérirent, moyennant cessation des travaux dans le tunnel, sans cure spéciale ;

18 °/₀ très susceptibles d'être guéris, moyennant abandon du tunnel et cure spéciale ;

7 °/₀ chez lesquels la maladie avait pris une tournure grave et qui se distinguaient par leur teint verdâtre ;

5 °/₀ chez lesquels la maladie était plus grave encore et qui présentaient peu de chances de guérison.

Il signale très peu de cas de mortalité pour les ouvriers qui ont pu être rapatriés.

Parmi les causes de cette anémie, il signale :

a) Aération insuffisante ;

b) Gaz nuisibles et irrespirables ;

c) Température élevée, cause de fièvre artificielle pendant toute la durée du travail ;

d) Parasites intestinaux.

Nous croyons, personnellement, qu'il faut ajouter encore d'autres causes, savoir : l'absence d'eau potable et l'absence de toute mesure de propreté et d'enlèvement des déjections humaines. Avec la grande dissémination des chantiers, répartis sur plus de 3 kilomètres de chaque côté des fronts d'attaque, il devait

arriver que les ouvriers buvaient des eaux contaminées. Ceux qui n'avaient pas déjà les germes de ces parasites et de cette anémie, connue avant la construction de ce tunnel sous le nom de *maladie des mineurs*, et qui était commune surtout chez les ouvriers italiens, introduisaient ces parasites dans leur organisme par l'usage de ces eaux contaminées. Sous l'influence multiple de la température élevée (la température de l'air a été jusqu'à 33°), d'un air surchargé d'humidité et d'une ventilation absolument insuffisante, ce parasite et les effets physiologiques qu'il produit ont pris un développement extraordinaire.

Sur les bêtes de trait, chevaux et mulets, l'influence de cette grande chaleur fut encore plus pernicieuse que sur les hommes.

Dans les derniers mois, on constatait la perte de plus de dix de ces animaux par mois pour chacun des deux chantiers; ils tombaient en général foudroyés par des congestions pulmonaires.

Ces difficultés amenèrent pour les ouvriers une diminution du travail produit; ils ne venaient au travail qu'un jour sur trois; il s'ensuivit une augmentation des salaires de 25 °/₀ et une diminution du nombre d'heures de travail de 7 à 5 par poste, et encore pendant ces cinq heures, l'ouvrier était paralysé dans son énergie et dans ses forces.

Aussi, dans ces conditions, les prix de revient de l'unité de travail furent-ils doubles et même triples de ce qu'ils étaient pour les premiers kilomètres. A cette augmentation du prix du travail s'ajoutait un ralentissement notable.

Examinons maintenant les moyens que l'on a d'atténuer les inconvénients de ces températures élevées.

Cette question a fait l'objet d'études très consciencieuses lors de l'expertise ordonnée par les cantons de la Suisse romande et la Compagnie Suisse Occidentale-Simplon, en 1886, sur les projets de percement du Simplon, expertise confiée à MM. Polonceau, Doppler, Huber, et à notre compatriote M. le colonel Jules Dumur. Ce dernier a surtout fourni une étude des plus complètes sur ce point.

Il faut, en tout premier lieu, organiser les travaux tout différemment de ce qu'ils l'ont été au tunnel du Gothard, et éviter

que les chantiers soient disséminés sur une trop grande longueur (plus de 3 kilomètres), ce qui rend la ventilation beaucoup plus difficile, et plus difficiles aussi les mesures hygiéniques de propreté et l'application des mesures réfrigérantes dont nous allons parler.

Il faut adopter un système de construction comme celui qui a été suivi au tunnel de l'Arlberg et concentrer tous les chantiers, de chaque côté, sur une longueur de 500^{m} au plus du front d'attaque. Là on trouvait à cette distance le tunnel entièrement terminé et revêtu en maçonnerie, et aucun obstacle ne s'opposait à la libre circulation de l'air.

Mais cela n'est possible qu'en rompant avec le système de la galerie d'avancement au faîte ou au cerveau et en perçant celle-ci à la base. De cette première galerie, on en établit une seconde au sommet au moyen de cheminées verticales.

Il faut surtout une ventilation surabondante, rendue plus facile par cette disposition des chantiers, mais qui exige aussi une force motrice importante. Heureusement qu'au Simplon, des deux côtés, les cours d'eau permettent d'obtenir des forces motrices abondantes, ce qui n'a pas été le cas au tunnel du Gothard. Cela se traduit par une augmentation de dépenses pour les installations mécaniques, aussi a-t-on prévu pour cet objet à peu près le double de la dépense qui a été faite au Gothard ; mais cette augmentation sera plus que compensée par les facilités qu'on procurera aux travaux et par l'abaissement de leur prix de revient.

Nous verrons, dans un moment, que cette ventilation peut être utilisée comme un moyen réfrigérant.

Il faut distribuer dans les chantiers de l'eau pure à l'usage des ouvriers.

Et il faut prendre des mesures pour éloigner les déjections humaines et éviter qu'elles contaminent et l'air et l'eau, en disposant des fosses mobiles que l'on déplace au fur et à mesure de l'avancement des travaux, et que l'on change fréquemment.

Il faut un service médical très soigné, qui comprend l'hygiène et la propreté des habitations, les bains, etc., etc.

Les divers moyens proposés jusqu'ici pour rafraîchir les chantiers profonds ont fait l'objet d'une étude approfondie de la commission d'expertise chargée, par les cantons de la Suisse romande et la compagnie Suisse Occidentale-Simplon, d'exami-

ner les projets pour la traversée du Simplon. Cette étude est plus particulièrement due à M. le colonel Dumur. Il examine :

1° le *refroidissement par la ventilation à pression normale.* Il se fonde sur le fait constaté au Gothard, que la température, non-seulement de l'air dans l'intérieur du tunnel, mais même de la roche s'est notablement abaissée depuis l'ouverture, c'est-à-dire depuis que le courant d'air produit une ventilation énergique. Mais il arrive à cette conclusion que la ventilation, bien que largement distribuée, ne pourra pas, à elle seule, permettre d'abaisser la température suffisamment; toutefois cette ventilation, nécessaire à bien d'autres égards, améliorera déjà considérablement la situation au point de vue de la chaleur.

2° *Rafraîchissement par projection d'eau pulvérisée et rafraîchie.*

Il y a sans doute quelque inconvénient à introduire encore de l'eau dans un tunnel où l'on cherche au contraire à s'en débarrasser; mais lorsqu'il ne s'agit que de petites quantités, cet inconvénient n'est pas sensible; ainsi, au tunnel de l'Arlberg, on n'a pas du tout été incommodé par les 7 litres d'eau que débitaient par seconde les machines perforatrices Brandt; on a au contraire remarqué que cette eau projetée et pulvérisée produisait un effet rafraîchissant, et fixait les poussières et les produits de l'explosion des mines.

On introduirait dans le tunnel de l'eau maintenue à la plus basse température possible, au moyen d'enveloppes non-conductrices des tuyaux. M. Dumur suppose cette eau à 15°, et qu'elle serait projetée et pulvérisée à une pression de 10 atmosphères.

Nous comptons, d'après les expériences faites au Gothard, que 1 mètre carré de paroi de tunnel abandonne à l'air $^1/_{100}$ de calorie par minute pour chaque degré de différence de température des deux milieux. La quantité de température qu'abandonneraient les parois des deux galeries de base et de faîte sur un kilomètre de développement maximum pris par les chantiers de construction (500^m de chaque côté) serait par minute (en supposant que l'on maintienne la température du milieu ambiant à 10° en moyenne au-dessous de la température correspondante de la roche) :

Galerie de base 1000^m à 10$^{m^2}$ de superficie à 0.01 calorie pour chaque degré de différence de température = 100 calories pour

10° d'abaissement . . . . . = 1000 calor.
Galerie haute 1000 × $8^{m2}60$ × 0.01 calor. × 10° = 860 »

soit un total de . . . . . 1860 calor.
ou en nombre rond 2000.

Si l'on suppose maintenant de l'eau projetée à 10 atmosphères et à une température de 15°, pour que l'eau parvienne à enlever à l'air une quantité de chaleur proportionnelle à sa propre augmentation de température jusqu'à 20° seulement, on trouve qu'il faudrait injecter, par minute, une masse d'eau telle que X litres × 5° = 2000 calories, d'où X = 200 litres par minute ou 3.5 l. par seconde.

Cette petite quantité d'eau ne donnera lieu à aucun inconvénient.

Pour cette projection d'eau il faudra une conduite de 0^m10 de diamètre, le travail à exécuter sera de 2000 kilogrammètres, nécessitant une machine de 30 chevaux.

On a observé récemment au puits de l'Eparre, à St-Etienne, que la pulvérisation de 10 litres d'eau par minute dans une galerie de mine avait abaissé la température de 3°.

Tout récemment M. Raoul Pictet m'a proposé d'introduire dans le tunnel et de projeter de l'eau à 0°, ce qui serait bien autrement efficace comme réfrigération.

3° *Rafraîchissement par la fusion de la glace.*

Ce mode de rafraîchissement est d'autant plus indiqué, que la glace, au moment de la fusion, absorbe l'humidité de l'air et a pour effet de l'assécher au lieu de le saturer davantage, pourvu que les mesures soient prises pour écouler aussi rapidement que possible l'eau provenant de la fusion. Ce dernier point se trouve réalisé par le système de construction avec galerie d'avancement à la base; l'aqueduc d'écoulement suivant de près l'avancement de la galerie.

Un kilogramme de glace exigeant 79 calories pour sa fusion, on voit que, dans les mêmes hypothèses que celles énoncées ci-dessus pour le rafraîchissement par l'eau pulvérisée, il faudrait introduire dans le tunnel $\frac{2000}{79}$ = 25 kilogrammes de glace par minute pour abaisser de 10° la température des chantiers sur un kilomètre de galerie de base et de faîte. Cette quantité représente une masse journalière de 40^{m3} de glace et ne fournirait

qu'un débit de $^1/_2$ litre d'eau par seconde dans le tunnel, ce qui est insignifiant.

4° *Rafraîchissement par l'expansion de l'air comprimé.*

Trois mètres cubes d'air comprimé à 4 $^1/_2$ atmosphères fournissaient au Gothard par leur expansion un rafraîchissement équivalent à 78 calories, suivant les constatations faites par M. de Stockalper.

Pour faire équilibre aux 2000 calories abandonnées par la roche en une minute dans les deux galeries de base et de faîte sur une longueur moyenne de 1 kilomètre (500^m de chaque côté), en les supposant rafraîchies de 10°, il faudrait par conséquent y introduire $\frac{2000}{78} = 25$ fois plus d'air que ci-dessus, soit 75^{m3} d'air comprimé (à l'origine à 5 atmosphères) par minute.

Un rafraîchissement complet des chantiers exigerait une force de 5000 chevaux de chaque côté du tunnel.

Si l'on admet toutefois qu'à partir des températures au-dessus de 30° l'on interrompe tous les travaux, sauf ceux de deux galeries d'avancement, on pourra se borner à ne rafraîchir complètement que ces chantiers d'avancement seulement. Il suffirait alors d'introduire dans chacun de ces chantiers 15^{m3} d'air à 5 atmosphères ou 10^{m3} à 8 atmosphères pour y maintenir une température d'une dizaine de degrés inférieure à celle de la roche, mais qui remonterait à cette dernière à 250^m environ en arrière des fronts de taille.

L'introduction de cette masse d'air exigerait 20 compresseurs et une force de 2000 chevaux à chaque tête de tunnel.

Les dépenses exigées par les divers moyens de rafraîchissement, dont nous venons de parler, seraient ainsi calculées :

1° *Ventilation à pression normale.*

4 ventilateurs Guibal	Fr. 200,000
Diaphragmes	» 200,000
Bâtiment, galeries supplémentaires, imprimés . .	» 100,000
Total . . .	Fr. 500,000

pour chaque côté du tunnel.

Plus la force motrice nécessaire de 400 chevaux de chaque côté du tunnel.

2° *Aspersion d'eau pulvérisée et rafraîchie.*

Si l'on suppose que l'on utilise directement la pression d'une chute d'eau, *ce qui est possible des deux côtés du tunnel*, les travaux se réduiraient à l'installation d'une simple conduite de 10 centimètres de diamètre, et la dépense pour chaque côté du tunnel serait de :

Captation d'eau	Fr.	15,000
10,000^{m} de conduite de 0^{m}100, y compris l'enveloppe non conductrice, à 20 fr. le mètre carré	»	200,000
Réseau dans les chantiers et appareils pulvérisateurs	»	40,000
Total pour un côté du tunnel . . .	Fr.	255,000

Plus la force motrice détournée qui serait de 30 chevaux de chaque côté. Mais vu l'abondance des forces motrices qu'on peut évaluer à 4000 ou 5000 chevaux de chaque côté, il n'y a pas à se préoccuper de ce détournement, ce qui reste de force motrice étant plus que suffisant pour les autres usages auxquels on peut l'affecter.

3° *Rafraîchissement par la fusion de la glace.*

Quantité journalière à introduire à chaque tête : 40$^{m^3}$.

Prix du mètre cube à la tête . . .	Fr.	15 —
Transport et manipulation	»	10 —
Total . . .	Fr.	25 —

soit pour 40$^{m^3}$ par jour 1000 fr.

En admettant que la durée du percement des deux derniers kilomètres (tunnel de 16 kilom., projet de 1886) de chaque côté, soit de . . . . . 450 jours
que le temps pour terminer ultérieurement soit de . 200 »
Ensemble . . . 650 jours
la dépense de chaque côté serait de 650,000 fr., soit pour l'ensemble de 1,300,000 fr.

Les experts ont fixé un prix de 15 fr. par mètre cube de glace; ce prix est très élevé, attendu qu'avec la machine de Raoul Pictet on peut fabriquer de la glace à 7 fr. le mètre cube, y compris l'intérêt et l'amortissement des machines, moteurs et dépenses d'installations.

4° *Rafraîchissement par l'expansion de l'air comprimé.*

Ce moyen exigerait, dès que l'on aborderait les températures intérieures élevées et supérieures à 30°, la suspension des travaux autres que ceux des galeries d'avancement.

Il demande 20 compresseurs et une force motrice de 2000 chevaux pour la compression uniquement.

Mais comme l'air comprimé serait utilisé aussi pour la perforation mécanique et que les installations ci-dessus n'atteignent pas le double de celles exécutées à l'Arlberg côté est, tandis que, dans le devis du Simplon, j'ai prévu, pour ces installations, une somme de plus du double de celles réellement dépensées à l'Arlberg, il n'y a donc pas lieu de prévoir des dépenses supplémentaires de ce fait.

La durée de la construction serait toutefois augmentée du fait de la suspension des travaux d'élargissement et de revêtement jusqu'après la rencontre des galeries. Ce retard peut être évalué à 15 mois (pour le tunnel de 16 kilom. projet de 1886).

En *résumé*, sur cette question des difficultés que l'on pourra rencontrer dans le tunnel du fait de la haute température, la commission d'expertise pense avoir établi qu'il est possible de les vaincre par l'un des divers procédés indiqués et même par l'emploi simultané de deux de ces procédés.

Les difficultés qui se sont produites au Gothard de ce chef seront considérablement atténuées, comme nous l'avons dit plus haut, par une bonne organisation des chantiers, par une ventilation surabondante, ce pourquoi nous avons à disposition les forces motrices nécessaires et avons prévu dans nos devis les installations suffisantes par une somme de 7 $^1/_2$ millions, c'est-à-dire plus du double de ce qui a été dépensé à l'Arlberg et près du double de ce qui a été employé au Gothard.

Les dépenses supplémentaires à faire pour ramener la température des chantiers à des conditions absolument normales, et éventuellement la prolongation de la durée des travaux pour atteindre ce but, peuvent parfaitement s'évaluer à l'avance.

Il est probable même que la nouvelle idée que vient d'émettre M. Raoul Pictet d'introduire et d'asperger de l'eau pulvérisée en pression à la température de 0° permettra d'atteindre ce but plus facilement, plus complètement et à moins de frais.

Nous pensons aussi que si, à l'amélioration de la ventilation, à la distribution d'eau pure et fraîche sur les chantiers, on

ajoute qu'on pourra réduire considérablement l'usage de la lampe de mineur, la chaleur qu'elle développe et les gaz irrespirables qu'elle produit, en la remplaçant par l'éclairage électrique ; si l'on supprime l'usage des animaux de trait pour les transports, animaux qui développent beaucoup de chaleur et d'humidité, et qu'on les remplace par des locomotives sans fumée ou à air comprimé, ou mieux encore qu'on organise aussi les transports par l'électricité, ce que les progrès réalisés dans ce sens permettent d'espérer sans témérité, on aura considérablement amélioré la situation au point de vue des inconvénients que présente la température élevée de la roche. Ainsi, sachant qu'on a sous la main et sans dépenses excessives les moyens d'abaisser cette température, on ne doit pas avoir trop de craintes d'aborder le percement du Simplon, malgré les quelques degrés dont elle dépasse celle rencontrée au Gothard.