Ventilations des tunnels alpins en construction

Autor(en): **Dapples, Ch.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **17 (1891)**

Heft 5 & 6

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-16479

VENTILATION DES TUNNELS ALPINS
EN CONSTRUCTION

par Ch. Dapples, professeur.

(Pl. N° 60.)

Lorsqu'un corps solide perd de la chaleur en faveur d'un corps fluide, qui la gagne, le transport de la chaleur d'un corps à l'autre a lieu suivant une loi formulée par Newton, vérifiée et complétée sur certains points par Dulong et Petit.

Le passage de la chaleur d'un milieu à l'autre se produit par deux moyens différents, premièrement par le rayonnement du corps chaud, secondement par son contact avec le fluide qui le touche. — La chaleur émise par une surface chaude en contact avec l'air atmosphérique peut s'exprimer par l'équation

$$dm = (k + r)\ S\ (T - t)\ dz$$

dans laquelle

m est un nombre de calories.
k le coefficient de convection.
r le coefficient de rayonnement.
S la surface d'émission en mètres carrés.
T la température de la surface chaude en degrés centigrades.
t la température de l'air en degrés centigrades.
z le temps.

Les coefficients k et r ont été déterminés par Newton, Dulong et Petit, Péclet, puis confirmés ou modifiés par Ser. Dans un article publié par M. l'ingénieur en chef Meyer, dans le bulletin de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes, année 1890, N° 8, on trouve une nouvelle valeur de k provenant des observations faites au Gothard, qui doit nécessairement attirer notre attention.

Si nous voulons, d'après Newton, appliquer les données fondamentales de la loi représentée ci-dessus au cas où la chaleur renfermée dans une roche passe dans l'air d'un tunnel, nous voyons, au premier coup d'œil, que la radiation ne joue aucun rôle puisque les parois de la galerie sont à la même température sur tout le périmètre.

La question se présente alors de la manière suivante :

La roche est à une température T, l'air du tunnel à une température t, qui tend à s'équilibrer avec T, mais nous voulons faire en sorte que t soit toujours notablement inférieur à T. Pour cela nous introduisons dans le tunnel une quantité à chercher d'air à une température basse θ. Cette masse d'air entre dans la galerie à θ degrés et en ressort à t degrés après avoir absorbé une certaine quantité de chaleur soustraite à la roche.

Désignons, comme plus haut, cette quantité de chaleur par m pendant un temps z nous aurons l'égalité :

$$m = k\ S\ (T - t)\ z.$$

Cette quantité de chaleur est transportée hors du tunnel par un poids d'air p, qui s'est réchauffé de θ à t degrés.

L'absorption de m calories a lieu en vertu de la chaleur spécifique de l'air c, nous pouvons donc écrire une nouvelle équation :

$$m = p\ c\ (t - \theta)\ z.$$

La quantité de chaleur qui sort du tunnel est nécessairement égale à celle qui sort de la roche, en sorte que nous pouvons poser l'égalité :

$$k\ S\ (T - t)\ z = p\ c\ (t - \theta)\ z$$

de laquelle nous tirons la valeur de p, qui nous intéresse tout particulièrement :

$$p = \frac{k\ S\ (T - t)\ z}{c\ \ (t - \theta)\ z} = \frac{k\ S}{c}\ \frac{(T - t)}{(t - \theta)}. \qquad (1)$$

Le poids d'air en kilogrammes à introduire par heure dans le tunnel à une température donnée est précisément la quantité qu'il nous importe de connaître, car c'est elle qui nous fournira le véhicule de chaleur par le moyen duquel nous pourrons parvenir à refroidir les galeries de travail, et à y rendre la vie humaine possible, par un renouvellement continu d'air respirable.

Au point de vue hygiénique, la fourniture d'air jouissant de toutes ses propriétés physiques et chimiques, doit être aussi abondante que possible, mais, au point de vue mécanique et économique, la valeur de p doit tendre vers un minimum.

Comment concilier ces deux exigences ?

La discussion de la formule (1) peut nous aider à résoudre la question.

Nous reconnaissons d'abord que les quantités k, S et c sont données et que nous n'avons pas la faculté de les faire varier à notre gré, sauf pour la valeur de k, dans une certaine mesure, comme nous le verrons plus loin.

La température de la roche T nous est imposée par les circonstances, mais nous pouvons désigner la température θ à laquelle l'air arrive dans la galerie, en tenant compte des moyens physiques et industriels par l'usage desquels il est possible d'abaisser le degré de chaleur d'un poids d'air donné, dans un temps déterminé.

Supposons qu'on ait trouvé le moyen de se procurer de l'air à une température basse θ, sans indiquer de chiffre, pour le moment, et que ce soit à ce degré que l'air afflue au point d'attaque. Nous aurons à déterminer, à chercher ou à nous donner la température t à laquelle nous jugeons que le personnel actif peut exister et travailler utilement dans le tunnel.

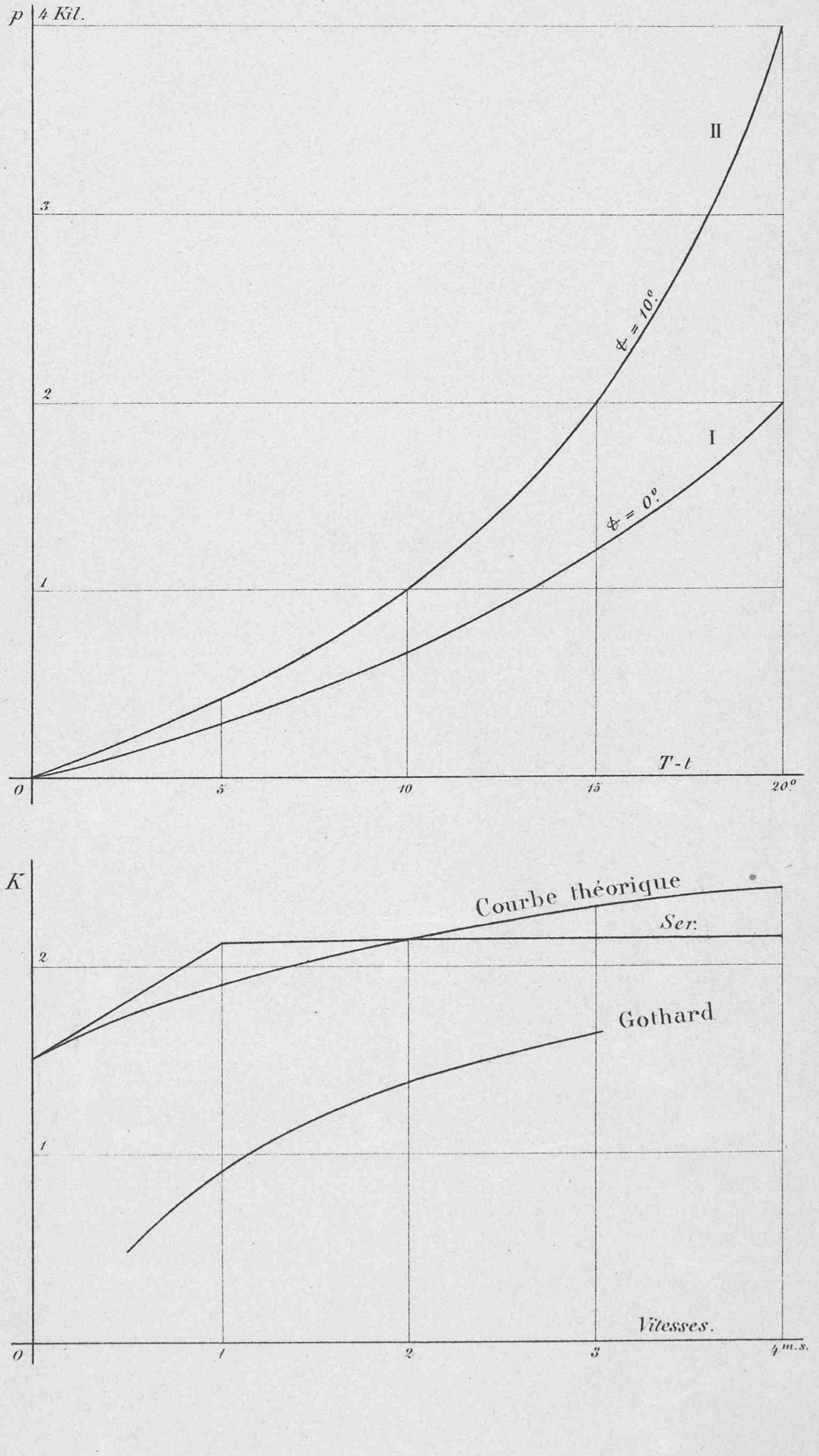
Dans le problème tel que nous le posons, la valeur de t est seule variable, limitée entre la température T de la roche et la température θ de l'air insufflé, eu égard aux procédés de refroidissement mis à notre disposition par la nature, la science et l'industrie.

Afin de diminuer la valeur de p il faudrait rendre aussi petit que possible le numérateur de la fraction $\frac{T - t}{t - \theta}$, c'est-à-dire rapprocher la valeur t de celle de T ; cette manière de faire n'est pas admissible puisque une des conditions du problème consiste à établir d'une façon permanente une différence thermométrique importante entre la roche et l'air respirable. Mais nous pouvons diminuer p en augmentant le dénominateur de la fraction, c'est-à-dire en augmentant, dans la mesure du possible, la différence $t - \theta$, ou, autrement dit, en faisant entrer dans le tunnel de l'air à une température θ très basse.

La formule (1) a une signification tout à fait générale, mais pour qu'elle serve à quelque chose, nous devons en faire l'application aux cas les plus probables, et nous ne pouvons pas faire mieux que d'admettre, sans y rien changer, les nombres renfermés dans l'article précité.

Supposons donc que la roche soit à 40° et que l'air du tunnel soit et demeure à une température de 10 degrés plus basse ; il nous reste à choisir le degré θ auquel méthodiquement il faudrait admettre que l'air insufflé se déversât vers le front

Ventilation des tunnels alpins en construction.



LITH. J. CHAPPUIS, LAUSANNE

Seite / page

leer / vide / blank

d'attaque ; c'est une température très basse, voisine de 0°, qui serait la plus convenable, mais il ne serait guère prudent de compter sur ce chiffre, c'est pourquoi nous admettons qu'il se déverse à 10 degrés centigrades.

Nous avons, en conséquence, calculé la valeur de p, soit le poids d'air à introduire par unité de temps dans le tunnel, les suppositions précédentes étant censées réalisées. Mais afin de mettre en évidence la loi qui régit le phénomène physique, nous avons cherché les valeurs de p pour deux séries de différences entre t et θ variant de degré en degré et étendues entre les limites extrêmes de θ égal à zéro et t égal à 39 degrés pour la première série, et de θ égal à 10 degrés et t égal à 39 degrés, pour la seconde série.

Les valeurs constantes de k S c sont les suivantes :

$k = 0{,}48$, comme dans l'artice cité du bulletin,

S = 1 mètre carré de surface de roche,

c = 0,237, chaleur spécifique de l'air.

$$\frac{k\mathrm{S}}{\mathrm{c}} = \frac{0{,}48}{0{,}237} = 2$$

I. $\theta = 0°$

T	t	T-t	t-θ.	p
40°	40°	0°	40°	0,00 kil.
»	39	1	39	0,05
»	38	2	38	0,11
»	37	3	37	0,16
»	36	4	36	0,22
»	35	5	35	0,28
»	34	6	34	0,35
»	33	7	33	0,42
»	32	8	32	0,50
»	31	9	31	0,58
»	30	10	30	0,67
»	29	11	29	0,76
»	28	12	28	0,86
»	27	13	27	0,96
»	26	14	26	1,08
»	25	15	25	1,20
»	24	16	24	1,33
»	23	17	23	1,48
»	22	18	22	1,64
»	21	19	21	1,81
»	20	20	20	2,00

II. $\theta = 10°$

T	t	T-t	t-θ.	p
40°	40°	0°	30°	0,00 kil.
»	39	1	29	0,07
»	38	2	28	0,14
»	37	3	27	0,22
»	36	4	26	0,31
»	35	5	25	0,40
»	34	6	24	0,50
»	33	7	23	0,61
»	32	8	22	0,73
»	31	9	21	0,86
»	30	10	20	1,00
»	29	11	19	1,16
»	28	12	18	1,33
»	27	13	17	1,53
»	26	14	16	1,75
»	25	15	15	2,00
»	24	16	14	2,29
»	23	17	13	2,61
»	22	18	12	3,00
»	21	19	11	3,46
»	20	20	10	4,00

S'il y a égalité entre T et t, p est égal à zéro, puis à mesure que les différences entre T et t augmentent, les valeurs numériques de p croissent, mais pas proportionnellement aux températures ; l'accroissement de p est plus rapide, d'une manière qui s'accentue toujours davantage à mesure que t diminue.

Pour maintenir la température de l'air à 10 degrés au-dessous de celle de la roche, il faudrait, d'après le calcul fait, insuffler dans le tunnel 0,67 kil. d'air à 0 degré par mètre carré de surface de galerie à refroidir et par heure.

Si l'air est insufflé à 10 degrés, les circonstances, nécessairement moins favorables, se traduisent par une augmentation des valeurs de p.

En effet, considérant le tableau II, on voit que les valeurs de p sont partout, excepté à 0, plus fortes que dans le cas précédent, mais nous voyons dans les deux tableaux numériques, et mieux encore sur les courbes qui les représentent graphiquement, que l'accroissement de p est beaucoup plus rapide lorsque $\theta = 10$ degrés que lorsque $\theta = 0$ degré ; il y aurait donc aggravation de charge à faire arriver de l'air à un degré θ relativement élevé.

De plus nous voyons une chose intéressante au point de vue pratique, c'est que pour des différences entre T et t comprises entre 0 et 10 degrés il n'y a pas une très grande importance à refroidir l'air insufflé à 0 plutôt qu'à 10 degrés.

Si une condition du problème est de maintenir T — t = 10, nous aurons à choisir entre les moyens industriels capables de fournir 1 kil. d'air à 10 degrés par heure et par mètre carré de surface à refroidir et 0,67 kil. d'air à 0 degré, pour obtenir le même résultat physique.

Les courbes représentant les valeurs de p sont, pour le faire remarquer en passant, des paraboles de la forme

$$y = a\, x^2.$$

La valeur de la constante a est égale à 0,005 dans le cas où $\theta = 0$ et égale à 0,010 dans le cas où $\theta = 10$ degrés.

Valeur du coefficient k.

On est frappé au premier coup d'œil de la faiblesse du coefficient k provenant des observations faites au Gothard par M. l'ingénieur Berchtle, mis en comparaison avec ceux que l'expérience a fournis à Péclet, Ser et d'autres, relatifs à l'émission de chaleur des murs en pierres calcaires. Ces derniers ont trouvé que dans un air calme chaque mètre carré de mur émet 1,5 calorie par heure et par degré de différence de température entre le mur chaud et l'atmosphère ambiante, abstraction faite du rayonnement.

Mais Ser a remarqué que l'émission par convection augmente avec l'agitation de l'air dans la mesure suivante :

Vitesse de l'air	0	$k = 1{,}50$
»	0,50 m. s.	$k = 1{,}68$
»	1,00 »	$k = 2{,}12$
»	2,00 »	$k = 2{,}14$
»	4,00 »	$k = 2{,}15$

tandis que les valeurs de k données par M. Berchtle, sont :

Vitesse de l'air	0,50 m. s.	$k = 0{,}486$
»	1,50 »	$k = 1{,}194$
»	3,00 »	$k = 1{,}626$

D'où peut venir cette différence énorme, qui va jusqu'à la proportion de 1 à 3 pour les vitesses inférieures à 0,50 mètre par seconde ?

L'examen par procédé graphique des chiffres fournis tendent à faire supposer que ceux de M. Berchtle sont trop faibles pour de petites vitesses, car la courbe semble émaner de l'origine des coordonnées et signifier ainsi que dans une atmosphère calme l'émission de chaleur par convection est nulle, ce qui n'est pas conforme à la réalité. On remarque d'ailleurs que la ligne a une courbure très prononcée, probablement trop prononcée dans sa première moitié, ce qui paraît dénoncer une mesure trop faible pour des vitesses du courant d'air inférieures à 1 m. par seconde.

La représentation graphique des nombres donnés par Ser indique des valeurs beaucoup plus fortes, mais pas entièrement satisfaisantes, car la courbe montre que lorsque la vitesse du vent dépasse deux mètres par seconde l'accroissement de transmission de chaleur est insignifiante, ce qui n'est pas non plus en rapport avec les faits ni avec les expériences dues à Ser lui-même, faites dans des circonstances très différentes, il est vrai, mais qui tendent à démontrer que le coefficient de convection par l'air est sensiblement proportionnel à la racine carrée de la vitesse avec laquelle il se déplace.

Les courbes représentant les résultats obtenus par M. Berchtle et par Ser (v. pl.) montrent que le nombre des observations faites dans l'un et l'autre cas est insuffisant pour établir des moyennes certaines.

La courbe théorique de la loi de la convection est représentée par l'équation

$$y = a + b\sqrt{x}$$

ou, d'après la notation que nous avons adoptée,

$$k = a + b\sqrt{v}$$

et si on admet, pour la comparaison, les valeurs constantes $a = 1{,}5$ et $b = 0{,}45$ on trouve les nombres suivants pour le coefficient de convection :

v	k
0	1,50
1	1,95
2	2,14
3	2,28
4	2,40

Influence du coefficient k.

Quelle est la valeur qu'il convient d'attribuer à k, dans les calculs de ventilation d'un tunnel ? Voilà un côté important et embarrassant de la question, cherchons à l'éclaircir par la discussion qui va suivre.

Nous voyons dans la formule (1) que k est au numérateur, ce qui nous apprend que plus ce coefficient deviendra grand, plus le poids d'air à introduire sera considérable pour maintenir une température déterminée à l'air respirable. Une quantité plus grande de chaleur sera soustraite à la roche et devra être transportée à l'extérieur par le véhicule gazeux que la nature nous offre.

Pour rendre p minimum, il faudrait faire k très petit, mais nous risquerions de tomber dans une erreur grave conduisant à des résultats trop faibles ; il vaut mieux prévoir que la valeur de k ne descendra pas au-dessous de celle que le Gothard a fournie, savoir 0,486 quoique M. de Stockalper ait trouvé, par ses propres recherches, le nombre 0,464 un peu inférieur au précédent.

Comme on l'a vu plus haut, nous avons cru devoir nous en tenir strictement aux données acquises par l'expérience, c'est pourquoi dans tous les calculs auxquels nous nous sommes livré, nous avons fait $k = 0{,}48$; c'est en tenant compte de cette valeur, que nous avons donné les nombres renfermés dans les tableaux I et II, représentés également par les courbes I et II.

Mais il se pourrait que dans l'exécution la valeur de la convection fût plus grande que celle que nous avons choisie, elle pourrait même être doublée, suivant les circonstances, puisque des auteurs dignes de toute confiance, ayant opéré dans des circonstances tout autres, il est vrai, lui ont attribué une valeur double et même triple.

Il est probable que dans un souterrain dont toutes les parois sont à la même température, en face les unes des autres, la transmission de la chaleur du solide au fluide se produit avec moins d'abondance que lorsque le corps chaud se refroidit dans une atmosphère ambiante ; il est certain que le rayonnement ne joue aucun rôle actif et il se peut que dans les expériences conduites par les physiciens précités, les effets de la radiation n'aient pas été assez complètement exclus, pour qu'on ait réussi à isoler d'une manière absolue la transmission par contact. De là sont résultés, peut-être, des coefficients de convection un peu trop forts.

Quelles pourraient être les conséquences pratiques d'une augmentation de la valeur de k ?

a) Supposons premièrement que l'apport d'air soit constant c'est-à-dire que les machines soufflantes donnent régulièremen le même débit ; p ne varie pas, mais si k augmente de valeur quelque chose doit changer pour maintenir l'égalité.

Deux facteurs peuvent varier dans notre équation, et subir les conséquences d'une modification positive de k, ce sont les différences $T - t$ et $t - \theta$. Le premier effet d'une amplification de k sera évidemment de diminuer la valeur $T - t$, soit d'élever la température du tunnel ; c'est la conséquence *naturelle* des choses envisagées au point de vue purement physique.

b) Mais il pourrait s'ensuivre une autre conséquence, pour le cas où on tiendrait à conserver intacte la condition du problème tendant à maintenir une différence de 10 degrés entre la roche et l'air ; cette conséquence n'a plus le caractère naturel de la première, elle est au contraire *artificielle* car elle oblige à augmenter artificiellement la différence $t - \theta$, c'est-à-dire à abaisser le degré θ.

Si les procédés mécaniques appliqués aux deux extrémités du tunnel sont assez énergiques pour pouvoir donner de l'air en excès sur les prévisions, la condition $T - t = 10$ pourrait être maintenue par une augmentation d'activité des machines, dans le cas où k deviendrait plus grand que 0,48, sans qu'il soit nécessaire d'abaisser la température θ. Mais si k venait à être doublé, la quantité d'air à injecter devrait être doublée également. Cette considération nous paraît avoir une grande importance pour l'étude des engins à mettre en activité pour rendre possible le travail des hommes sous de grandes masses rocheuses.

D'après les observations de M. Berchtle le coefficient k passe de 0,486 à 1,194 lorsque la vitesse de l'air dans le tunnel passe de 0,50 à 1,50 mètre par seconde ; or les galeries d'attaque ont une section d'environ 5 mètres carrés, qui donnerait pour une vitesse de 1,50 mètre par seconde un débit de 7,5 mètres cubes soit 8 à 9 kg. d'air par seconde pour une galerie, conditions qui ne se rencontreront jamais dans l'exécution.

Comme on le verra plus loin, le déplacement général de l'air dans une galerie ne se produira pas avec une vitesse supérieure à $^1/_2$ mètre par seconde, mais il conviendra probablement d'injecter l'air froid contre la roche par un procédé quelconque, dans les détails duquel nous n'avons pas l'intention d'entrer, et alors l'effet de la friction produite par le mouvement pourrait bien porter à une valeur supérieure le coefficient de convection. Seulement cela se produira sur des surfaces tellement restreintes qu'il ne vaut pas la peine d'en tenir compte dans l'ensemble.

D'après l'article de M. Meyer, la galerie de base, longue de 1000 mètres, pour les deux attaques ensemble, avec un périmètre de 10 mètres aurait une surface d'émission de 10 000 mètres carrés. La galerie haute, de même longueur, ayant un périmètre de 8,60 mètres aurait une surface d'émission de 8600 mètres carrés, total 18 600 mètres carrés.

D'autre part le calcul nous donne la quantité d'air en poids, qu'il est nécessaire d'introduire dans le tunnel à une température donnée θ et d'en extraire à une température t, pour obtenir une différence permanente $T - t = 10$ degrés.

Dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire dans celui où l'air affluerait à 10 degrés centigrades, nous trouvons dans le tableau II et sur la courbe correspondante que la condition posée est satisfaite par une valeur de p égale à 1 kil. d'air par mètre carré de surface d'émission et par heure. Pour une surface de 18 600 mètres nous devons par conséquent fournir aux galeries 18 600 kil. d'air par heure, soit 5,2 kil. ou environ 5 mètres cubes par seconde.

Cette quantité d'air est en réalité destinée à quatre galeries, deux à chaque attaque, ce qui porte la quantité afférente à une galerie à 1,25 mètre cube par seconde. La section des galeries étant d'environ 5 mètres carrés, il en résulte que la vitesse de l'air circulant dans une galerie est de 0,25 mètre par seconde.

Nous n'avons donc pas à redouter une grande augmentation du coefficient k provenant du frottement, et nous sommes bien loin du cas extrême exprimé par M. de Stockalper, dans les termes suivants :

« On ne peut songer à faire parcourir les chantiers d'un tunnel en construction par un courant d'air ayant une vitesse supérieure à 4 mètres par seconde, correspondant à celle d'un vent modéré. »

Cela veut-il dire que l'étendue des moyens à employer soit fixée par l'application pure et simple de la formule (1), c'est ce que nous discuterons plus loin lorsque nous nous occuperons des conditions d'exécution.

En attendant, et comme vérification de nos calculs, envisageons la question par le côté qui touche uniquement au calorique.

La surface d'émission des galeries d'avancement étant de 18 600 mètres carrés, la quantité de chaleur émise par heure, pour $T - t = 10$ est :

$$18\,600 \times 10 \times 0{,}48 = 89280 \text{ calories}$$

et le poids d'air par heure devient

$$p = \frac{89280}{0{,}237 \times 20} = 18835 \text{ kil.}$$

soit 5,23 kil. par seconde, nombre sensiblement égal à celui que nous avons extrait directement de l'équation (1). Cela nous fait de nouveau 5 mètres cubes par seconde d'air à répartir entre quatre galeries.

Cette quantité de 5 mètres cubes pour l'ensemble des travaux s'éloigne beaucoup de celle de 20 mètres cubes mentionnée dans le travail de M. l'ingénieur en chef Meyer, comme application de la formule de M. Devilly.

Nous ne sommes pas en mesure de vérifier le nombre indiqué, parce que les données du problème tel que se l'est posé M. Devilly manquent, mais évidemment il est parti du point de vue que l'air entre dans la galerie à une température relativement élevée. L'application de la formule (1) au cas cité attribuerait à $t - \theta$ une valeur de 5 degrés et par conséquent à θ une valeur de 25 degrés.

Avec la mention de 20 mètres cubes par seconde, on trouve dans le même article l'indication intéressante suivante :

« Pour réaliser cette ventilation, il faudrait une dépression totale de 170 millimètres, que l'on peut obtenir par un ventilateur Guibal exigeant une force de 113 chevaux. »

(A suivre.)

NÉCROLOGIE

ADOLPHE DE SALIS

Inspecteur fédéral en chef des Travaux publics.

Le 5 mai 1891 au matin est décédé à Berne, à l'âge de 73 ans, Adolphe de Salis, inspecteur en chef des travaux publics de la Confédération suisse. Il a succombé, après une longue et douloureuse maladie, à une affection de la gorge à laquelle il n'attacha pas d'importance au début, mais qui dégénéra en maladie incurable du larynx. Des opérations répétées, supportées avec un admirable courage, ne réussirent pas à l'en guérir. Aussi la mort fut-elle pour M. de Salis une délivrance ardemment désirée, mais attendue patiemment, avec une calme résignation à l'égard des dispensations de Dieu. La paix dans laquelle se sont écoulés les derniers moment d'une vie si remplie a laissé l'impression la plus consolante à tous les siens qui l'entouraient.

Connu comme il l'était dans la plupart des cantons de la Suisse, grâce aux fonctions qu'il remplissait depuis tant d'années au service de son pays, la mort d'Adolphe de Salis n'a pu que faire partout une grande sensation et exciter de vifs