

**Zeitschrift:** Bulletin de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes  
**Band:** 7 (1881)  
**Heft:** 2

**Artikel:** Le tube atmosphérique du puits Hottinguer dans les houillères d'Épinac  
**Autor:** [s.n.]  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-8669>

### **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:** 15.04.2026

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

Chaque chaîne est soumise à une tension de 181 tonnes. Le poids des huit chaînes avec croupières d'assemblage (voir plus loin) est de 41 tonnes. L'ancrage a lieu contre 4 fers double T de  $500/139$  à 136 kilos par mètre courant et de  $3^m50$  de longueur, s'appuyant contre le roc au moyen de plaques en fonte de  $1250/1100/17$ . L'extrémité des chaînes est arrêtée par une double clavette de réglage de  $75/75$  millimètres s'appuyant contre les fers double T par l'intermédiaire de barres de fer plates de  $1100/170/16$  logées dans les intervalles des chaînons.

Le poids des fers et fonte de l'ancrage est de 26 tonnes. Les chaînons, au nombre de 776, sont assemblés par des boulons de jonction (axes) de 8 centimètres de diamètre (68 pièces), du poids de 18 kilos.

Aux points d'inflexion des chaînes à l'entrée des puits, les chaînes passent sur des sabots en fonte du poids de 1007 kilos pièce, lesquels reposent sur des blocs en calcaire de Saint-Triphon, scellés dans la molasse. Les chaînons (reposant sur le sabot), de 400 millimètres de longueur d'axe en axe des boulons, sont forgés suivant la courbure du sabot. Cette partie des chaînes ne travaille qu'à 7 kilos par millimètre carré.

L'appareil sur les portiques est formé d'un sabot en fonte du poids de 895 kilos, reposant sur 5 fers double T disposés en *secteurs oscillants* et reliés entre eux par deux tringles en fer de chaque côté. Le poids d'un appareil est de  $2^t,75$ .

La pression exercée par un nouveau câble sur l'appareil est de 245 tonnes.

Le poids total de la partie métallique (fil de fer, fer et fonte) est d'environ 215 tonnes.

L'assemblage des chaînes avec le câble est disposé comme suit : L'extrémité de la chaîne se bifurque en deux parties sous forme de V, de manière à recevoir une croupière à triple gorge du poids de 246 kilos ; autour de cette gorge s'enroulent les fils du câble, lequel est divisé, à cet endroit, en 12 brins, soit 6 pour chaque chaîne. La croupière s'appuie contre les clavettes d'une manière analogue aux fers double T dans l'ancrage.

Les frais de consolidation s'élèveront à :

1° Câbles et chaînes, fourniture et pose, peinture, rendus posés pour un prix à forfait (Chappuis et C <sup>o</sup> à Nidau)	Fr. 121 000
2° Allongement et réglage des tiges, prix à forfait (les mêmes)	» 3 000
3° Excavation des nouveaux puits, élargissement des galeries de service et démolition de maçonneries (en régie)	» 12 220
Total,	Fr. 136 220
A ajouter pour imprévus et petits travaux accessoires	» 3 780
Dépense totale,	<u>Fr. 140 000</u>

Soit 88 fr. par mètre carré de tablier.

Les tiges pendantes sont alternativement fixées aux anciens et aux nouveaux câbles, de façon que le poids de la construction et celui de la surcharge sont supportés la moitié par les anciens et la moitié par les nouveaux câbles.

L'allongement des anciennes tiges s'est opéré au moyen d'un petit câble plié en deux et placé à cheval sur le nouveau câble ; entre les extrémités de ce petit câble munies de petites croupières vient s'adapter la croupière de la tige de suspension

tournée dans le sens contraire. A travers ces trois croupières passe la clavette de réglage.

En terminant, nous dirons encore quelques mots de l'opération du réglage.

Il a été admis que les nouveaux câbles seraient posés parallèlement à 50 centimètres au-dessus des anciens. Mais comme les nouveaux câbles devaient s'abaisser (augmentation de la flèche) après la suspension du tablier et les anciens, déchargés de la moitié de ce poids, se relever, il a fallu donner au milieu un écartement tel, entre les deux systèmes de câbles, pour qu'après la répartition du poids cet écartement se rapprochât de 50 centimètres. Il a été admis éventuellement un écartement de  $1^m20$  et, selon les prévisions actuelles, l'écartement des deux câbles après le réglage sera entre 45 et 50 centimètres. On peut bien calculer l'abaissement des nouveaux câbles ; par contre, le relèvement des anciens échappe à tout calcul, car on ne connaît pas de combien ils ont perdu de leur élasticité. Nous pensons beaucoup moins qu'on ne le suppose. Nous en avons une preuve indirecte dans la manière dont ils se comportent sous l'influence de la température.

## LE TUBE ATMOSPHÉRIQUE DU PUIT HOTTINGUER

DANS LES HOULLÈRES D'ÉPINAC

(Suite.)

*Marche théorique.* — Comme plus haut, nous considérons dans ces calculs le cas d'un tube simple et d'un tube conjugué.

*Cas d'un tube simple.* — Soit un tube A de longueur L, de diamètre D et de section S, rempli d'air à la pression P. Il renferme à la partie inférieure le piston M du poids Q et la charge utile C qu'il supporte. Il communique avec l'atmosphère à la partie inférieure, et à la partie supérieure par l'orifice à robinet g. Par le sommet, il est relié avec la machine pneumatique par le tuyau I. (Pl. I, fig. 1 et 2.)

*Période de raréfaction ou d'équilibre.* — Sous l'action de la machine pneumatique l'air est raréfié au-dessus du piston, sa pression diminuant comme les termes d'une progression géométrique qui a pour raison le rapport du volume V du tube à ce même volume augmenté du volume W des cylindres de la machine. Ainsi P étant la pression atmosphérique, et p celle de l'air dans le tube après un nombre de coups de piston, on a l'équation :

$$p = P \left( \frac{V}{V + W} \right)^n, \quad (1)$$

d'où vient

$$n = \frac{\log p - \log P}{\log V - \log (V + W)}. \quad (2)$$

A un certain moment de la raréfaction, la pression de l'air est descendue de P à  $p_1$  de telle sorte que le piston M et sa charge sont en équilibre dans le tube et on a :

$$p_1 + \frac{Q + C}{S} = P \quad (3)$$

ou

$$Q + C = S (P - p_1). \quad (4)$$

Ce qui indique que, sous une même dépression, le poids total élevé dans le tube est proportionnel à sa section ; que pour

une même section, il est proportionnel à la dépression, et enfin qu'il serait à son maximum avec  $p_1 = 0$ , c'est-à-dire dans le cas du vide parfait dans le tube.

*Période d'avalement ou d'ascension.* — La machine pneumatique continuant le vide, l'équilibre est rompu, et le piston monte dans le tube à la faveur de la dépression, poussé par l'air qui arrive en  $e$ , en parcourant un chemin proportionnel au volume d'air avalé par la machine, de telle sorte que si ce volume  $W$  est  $\frac{1}{n^{\text{ème}}}$  du volume  $V$  du tube, le piston avance dans le tube de  $\frac{1}{n^{\text{ème}}}$  de sa longueur  $L$ . Le chemin qu'il parcourra sera donc de :

$$x = L \times \frac{W}{V} \quad (5)$$

ou

$$x = \frac{W}{S}. \quad (6)$$

Il suit de là que la vitesse d'ascension du train est proportionnelle au rapport du volume de la machine pneumatique à la section du tube. En d'autres termes, en se rapportant à la formule (4), le tube comporte un tonnage proportionnel à sa section, et la vitesse du train est proportionnelle à la force de la machine pneumatique.

*Descente de train.* — Lorsque le train est arrivé au sommet du tube, la cage est déchargée, et les chariots vides remplacent les chariots pleins. Le train, diminué du poids  $C$ , n'offre plus que le poids  $Q$  qu'il s'agit de faire descendre sous la pression  $p_2$  de l'air au-dessus du piston qui correspond à l'équation d'équilibre :

$$p_2 + \frac{Q}{S} = P, \quad (7)$$

d'où

$$Q = S(P - p_2). \quad (8)$$

Dans ces conditions, la communication avec la machine pneumatique est interrompue, l'ouverture  $e$  est fermée, le tuyau  $E$  est ouvert par  $G$ , et l'air est admis sur le piston par l'orifice  $O$  à robinet. L'orifice  $O$  et le tuyau d'échappement  $E$  fonctionnent de telle sorte qu'avec la pression maintenue par l'éloignement du train à  $p_2$  sur le piston, à chaque entrée par  $O$  d'un volume d'air  $y$  à la pression  $P$  correspondant à un volume  $q$  sous la pression  $p_2$ , il se fait par  $E$  une sortie d'air du même volume  $q$  à la pression ordinaire  $P$ . Le train, toujours en équilibre, descend ainsi au fur et à mesure de l'arrivée et de l'écoulement de l'air avec la vitesse de ce dernier au-dessous du piston dans le tube, et d'après les relations suivantes :

$$q = Sx, \quad (9) \quad x = \frac{q}{S}, \quad (10)$$

$$q = sX, \quad (11) \quad X = \frac{q}{s}, \quad (12)$$

$$y = q \frac{p_2}{P}, \quad (13)$$

$x$  et  $X$  représentant la vitesse de l'air dans le tube à section  $S$ , et dans le tuyau à section  $s$ .

On doit régler l'orifice  $O$  en fonction de la vitesse déterminée par  $\frac{q}{s}$ , et de  $y$ . Il n'y a pour cela, en représentant par  $O$  la section cherchée, qu'à satisfaire à la relation

$$O = \frac{q \frac{p_2}{P}}{\sqrt{2gh}} \quad (14)$$

dans laquelle  $h$  exprime en mètres la hauteur de la colonne d'air correspondant à la différence de la pression entre  $P$  et  $p_2$ .

Les formules (13) et (14) montrent d'ailleurs que la vitesse du train est proportionnelle à la quantité d'air admis sur le piston, et que cette quantité d'air est proportionnelle à la fois à l'orifice d'admission, et à la pression de l'air au-dessus du piston.

*Différence de travail entre le premier voyage et les suivants.* — Le train étant arrivé au bas du tube, le second voyage et les suivants se feront comme le premier, avec cette différence qu'il n'y aura qu'à déprimer l'air de la pression  $p_2$  à la pression  $p_1$ , tandis qu'au premier voyage la dépression était à faire de  $P$  à  $p_1$ . Dans tous les voyages, moins le premier, le travail de raréfaction sera donc simplifié et la formule (1) deviendra :

$$p_1 = p_2 \left( \frac{V}{V+W} \right)^n, \quad (15)$$

d'où

$$n = \frac{\log p_1 - \log p_2}{\log V - \log (V+W)}. \quad (16)$$

*Cas de deux tubes conjugués.* — Dans le cas de deux tubes conjugués, rien ne change dans le principe du système qui reste fondé sur les mêmes lois. Mais le travail devient plus facile par la conjugaison qui permet à la fois de développer un travail moindre pour la même production, et d'obtenir une production plus grande dans le même temps.

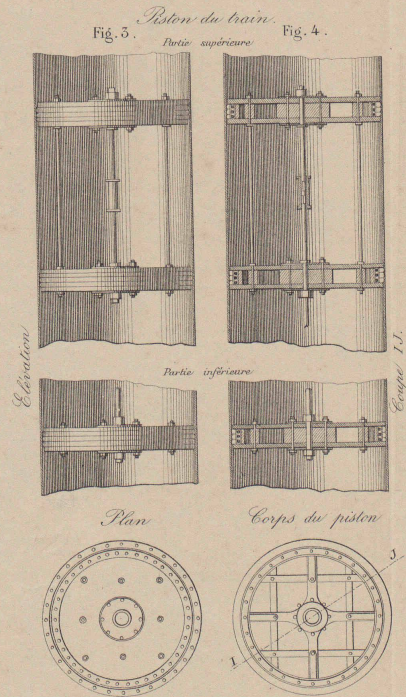
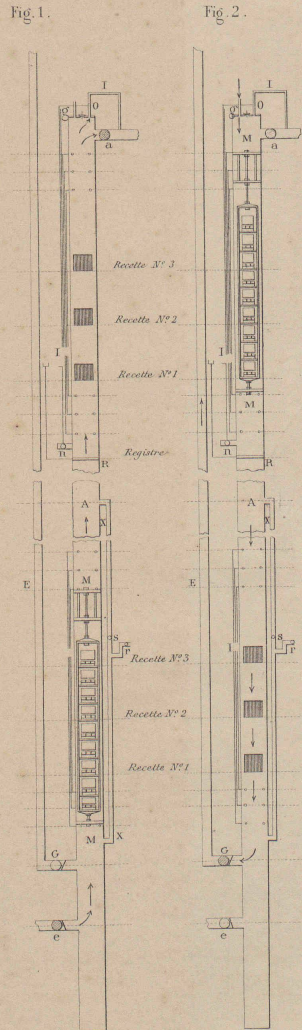
*Deux périodes comme avec un tube simple.* — Que l'on considère, en effet (pl. V, fig. 3), deux tubes  $A_1$  et  $A_2$  contenant chacun un piston  $M_1$  et  $M_2$ , l'un à la partie inférieure, l'autre à la partie supérieure, et disposés pour communiquer alternativement en bas avec le tuyau d'échappement  $E$ , et en haut avec la machine pneumatique, prenant successivement à chaque voyage l'air dans le tube  $A_1$  pour le refouler dans le tube  $A_2$ , et inversement dans le tube  $A_2$  pour le refouler dans le tube  $A_1$ ; le piston  $M_1$  montera quand le piston  $M_2$  descendra, l'air à la pression  $P$  arrivant sous le piston  $M_1$  par  $e_1$  pendant qu'il est refoulé par  $M_2$  dans le tuyau  $E$  et réciproquement.

Deux périodes auront lieu dans l'action de la machine pneumatique avec deux tubes comme dans le cas d'un seul, la période de raréfaction et la période d'avalement.

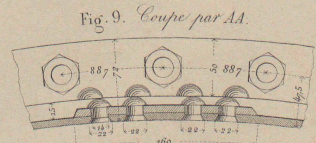
*Première période. Chemin fait par le piston à vide pendant que le piston à charge est mis en équilibre.* — Pour la première période, prenons les deux tubes remplis d'air à la pression  $p_2$  au-dessus des pistons  $M_1$  et  $M_2$  qui renferment le premier le poids  $Q + c$ , le second le poids  $Q$ . Le piston  $M_1$  est au fond du tube  $A_1$ , et le piston  $M_2$  au sommet du tube  $A_2$  où il se trouve en équilibre sous la pression  $p_2$ . Pour faire monter  $M_1$  et descendre  $M_2$ , il faut, d'une part, abaisser la pression dans le tube  $A_1$  de  $p_2$  à  $p_1$ , et d'autre part, envoyer dans le tube  $A_2$  l'air qui sera pris en  $A_1$  à des pressions géométriquement décroissantes de  $p_2$  à  $p_1$ , pour être refoulé sous la pression  $p_2$ . C'est ce que fera la machine pneumatique en aspirant l'air dans un tube pour le verser dans l'autre, et voici alors ce qui se passera.

A chaque volume d'air à pression décroissante pris en  $A_1$  pour être envoyé en  $A_2$ , le piston  $M_2$  parcourra un chemin décroissant lui-même comme la progression géométrique selon

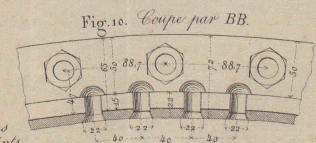
*Systeme atmosphérique d'extraction L<sup>e</sup>. Blanchet.*



Echelle de 1/50 pour les Figures 3 et 4.



Echelle de 1/2000<sup>e</sup> les Fig. 1 et 2.



Echelle de 1/4 pour les Fig. 9, 10 et 11.

Fig. 5. Suspension d'un tube simple.

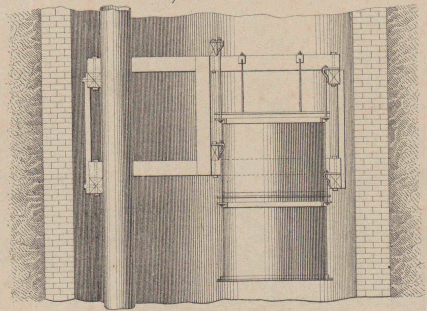
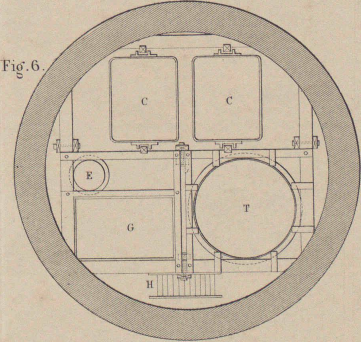


Fig. 6.



Division du puits avec tube simple.

Fig. 7.

Suspension de deux tubes conjugués

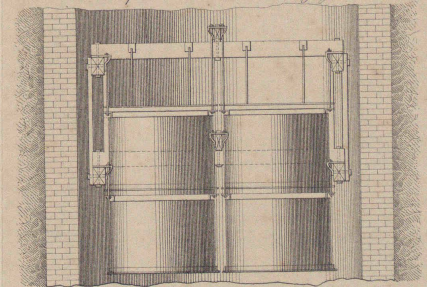
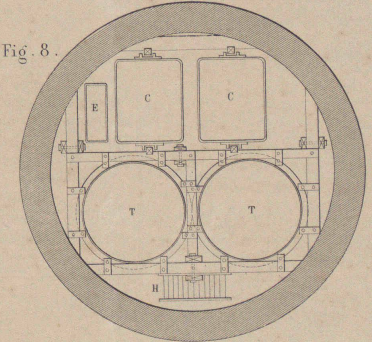
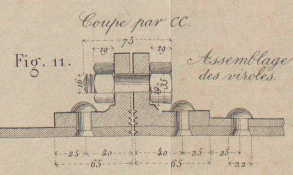


Fig. 8.



Division du puits avec deux tubes conjugués.

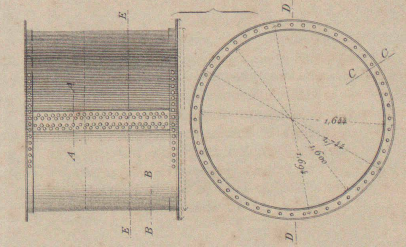
Echelle de 1/75 pour les Fig. 5, 6, 7 et 8.



Echelle de 1/40 pour la Fig. 11.

Fig. 12.

Virole ordinaire.



Seite / page

leer / vide /  
blank

laquelle la pression en  $A_1$  descendra de  $p_2$  à  $p_1$ . Lorsque la pression en  $A_1$  sera arrivée à  $p_1$ , le piston  $M_1$  sera en équilibre, la période de raréfaction sera achevée, et le piston  $M_2$  aura descendu dans le tube  $A_2$  par hauteurs successives décroissantes  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_3, x_2, x_1$ , dont la somme  $x$  sera d'une hauteur égale à celle dont le volume d'air contenu dans le tube  $A_1$  de hauteur  $L$ , aurait à augmenter pour passer de la pression  $p_2$  à la pression  $p_1$ . Cette hauteur est donnée par l'expression :

$$x = L \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right). \tag{17}$$

Il suit de là,  $p_2$  étant toujours plus grand que  $p_1$ , que la valeur de  $x$  sera proportionnelle au rapport des pressions de l'air sur chaque piston. Elle sera nulle si les pressions sont les mêmes, et en général  $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}$  ou  $\frac{1}{n^{\text{ème}}}$  de  $L$  selon que le rapport des pressions sera de  $1 + \frac{1}{2}, 1 + \frac{1}{4}$  ou  $1 + \frac{1}{n^{\text{ème}}}$ .

*Deuxième période.* — Dans la deuxième période, c'est-à-dire après le moment d'équilibre du piston  $M_1$ , la machine pneumatique avalera l'air du tube  $A_1$  par volumes égaux à la pression constante  $p_2$ , qu'elle refoulera aussi par volumes égaux sous pression constante  $p_2$  dans le tube  $A_2$ . Le train  $M_1$  s'élèvera uniformément avec la vitesse  $L \frac{W}{V}$  à chaque coup de piston, et le train  $M_2$  continuera à descendre en prenant une vitesse uniforme  $L \times \frac{W}{V} \times \frac{p_1}{p_2}$  égale à celle qu'il avait dans le dernier instant de sa marche à vitesse décroissante. Les deux trains arriveront ainsi en même temps l'un au bas de sa course, l'autre au sommet de la sienne.

Après le premier voyage, tous les autres se continueront de la même manière. Il n'y aura qu'à renverser les conditions réciproques de chaque tube avec la machine pneumatique et le tuyau d'échappement.

On voit par tout ce qui vient d'être dit que le système à deux tubes conjugués réalise bien les avantages énoncés, la production plus grande tenant à ce qu'un train monte quand l'autre descend ; le travail moindre résultant de ce que la dépression ou la compression de l'air sont simplifiées et réduites pour un même résultat, leur variation ne se faisant plus qu'entre des limites inférieures à la pression atmosphérique  $P$ , c'est-à-dire de la pression d'équilibre à charge  $p_1$  à la pression d'équilibre à vide  $p_2$  dont la plus grande est sensiblement plus petite que  $P$ .

*Cas du réservoir régulateur à volume variable.* — Si l'on avait un seul tube conjugué avec un réservoir à volume variable obtenu d'une façon ou d'une autre, soit par un puits à petite profondeur et à large section, soit par une cloche mobile comme les gazomètres, capable en tout cas de fournir le volume  $V$  du tube, on obtiendrait l'un des avantages de la conjugaison de deux tubes, c'est-à-dire celui de faire un travail moindre pour une extraction donnée. Alors tout se comporterait théoriquement comme précédemment, avec cette différence que les vitesses du grand piston et du petit piston seraient inversement proportionnelles à leurs sections.

L'appréciation des circonstances de travail à obtenir et de frais d'installation à dépenser dans lesquelles on se trouvera pour la conjugaison avec piston ou cloche d'équilibre, fera voir ce qu'il conviendra de faire pour adopter ou rejeter son emploi.

*Réservoir à volume constant.* — Le réservoir à volume déterminé en fonction du volume du tube et des dépressions de marche aurait aussi pour résultat de réduire le travail à développer, mais il enlèverait à ce travail son roulement uniforme et générerait par suite les moteurs à vapeur qui, pour un voyage, auraient progressivement à accroître leur force du départ du train du fond du tube à son arrivée à l'orifice. En effet, dans ce cas, le volume du réservoir devrait être tel que le train y puiserait l'air nécessaire à sa descente pour l'y refouler à son ascension, ce qui exigerait une variation de pression de  $P$  à  $p_2$ , d'où il vient pour la capacité  $X$  du réservoir,  $V$  étant le volume du tube :

$$X = V \left( \frac{P}{p_2} - 1 \right). \tag{18}$$

Ainsi, selon que le rapport de  $P$  à  $p_2$  sera de 2, 3 ou  $n$ , le volume du réservoir sera le même que celui du tube, double, ou  $(n - 1)$  fois aussi grand.

*Conclusions sur les réservoirs.* — Le réservoir à volume variable peut seul être avantageux, à moins d'avoir un réservoir à volume constant de construction naturelle et partant économique. Dans le réservoir à volume variable, c'est par la conjugaison de tubes égaux que seront obtenus les meilleurs résultats.

*Calculs dynamiques.* — Nous adopterons, pour l'établissement des calculs du travail développé dans le fonctionnement du système, le même ordre que dans l'exposé de sa théorie. Nous distinguerons, en conséquence, deux cas, et dans chaque cas deux périodes. Nous poserons d'ailleurs les données ci-dessous se rapportant au puits Hottinguer :

(a)	
D	diamètre du tube..... 1 <sup>m</sup> ,60
L	longueur..... 1 000 ,00
S =	$\frac{\pi D^2}{4}$ section..... 2 ,00
Q	poids mort du $\left\{ \begin{array}{l} \text{piston} \dots 1\,375 \text{ kilog.} \\ \text{cage} \dots 1\,400 \text{ } \gg \\ \text{chariots} \dots 2\,250 \text{ } \gg \end{array} \right\}$ ..... 5 025 kilog.
C	poids utile du train..... 4 500 »
Q + C	poids total du train..... 9 525 »
f	frottement positif à l'ascension..... 475 »
f	frottement négatif à la descente..... 250 »
P	pression atmosphérique..... 10 000 »

Nous aurons ainsi pour exprimer les pressions d'équilibre  $p_1$  et  $p_2$  à charge et à vide, c'est-à-dire pour la montée et la descente en fonction de la pression atmosphérique  $P$ , les deux formules :

$$\frac{Q + C + f}{S} + p_1 = P, \tag{19}$$

$$\frac{Q - f}{S} + p_2 = P, \tag{20}$$

et

$$p_1 = P - \left( \frac{Q + C + f}{S} \right), \tag{21}$$

$$p_2 = P - \left( \frac{Q - f}{S} \right). \tag{22}$$

*Cas d'un seul tube. Deux périodes.* — En marche normale, avec un seul tube, la première période, dite de raréfaction, com-

prendra le travail développé pour déprimer l'air de  $p_2$  à  $p_1$ , la seconde, dite d'avalement, sera celle du travail nécessaire pour prendre l'air dans le tube à la pression  $p_1$  et le refouler dans l'atmosphère à la pression  $P$ .

*Première période.* — Pour la raréfaction, le travail fait par la machine pneumatique dans le tube, pour amener la pression de  $p_2$  à  $p_1$  au-dessus du piston, est égal à la différence de ceux  $T_2$  et  $T_1$ , qu'il y a à faire pour abaisser la pression d'un côté de  $P$  à  $p_2$ , de l'autre côté de  $P$  à  $p_1$ . Dans les deux cas, il est le même que celui qui serait fait par un piston qui serait placé à  $x_2$  ou  $x_1$ , au-dessus de l'extrémité inférieure du tube de longueur  $L$  libre par le haut, et qui parcourrait un chemin d'une longueur  $L - x_2$  ou  $L - x_1$ , telle que la pression inférieure de l'air resté dans le tube, sur la hauteur  $x_2$  ou  $x_1$  du tube idéal au-dessus du fond du tube, soit abaissée à  $p_2$  ou  $p_1$ . Or, en tout cas, le travail du piston sera égal à celui qu'il fera sur le chemin  $L - x_2$  ou  $L - x_1$  à pleine pression  $P$ , diminué de celui fait en contre-pression, par le volume d'air de hauteur  $x_2$  ou  $x_1$  se détendant suivant la loi de Mariotte.

On aura donc pour  $T_1$  et  $T_2$  les expressions :

$$T_1 = SP(L - x_1) - SPx_1 \log \text{hyp.} \frac{L}{x_1}, \quad (23)$$

$$T_2 = SP(L - x_2) - SPx_2 \log \text{hyp.} \frac{L}{x_2}, \quad (24)$$

Ou en remplaçant  $x_1$  et  $x_2$  par leurs valeurs calculées en fonction de  $p_1$  et de  $p_2$  avec  $P$  :

$$T_1 = SP \left( L - L \frac{p_1}{P} \right) - SPL \frac{p_1}{P} \log \text{hyp.} \frac{L}{\frac{p_1}{P}} = \left. \begin{aligned} &= SL \left( P - p_1 - p_1 \log \text{hyp.} \frac{P}{p_1} \right), \\ &T_2 = SL \left( P - p_2 - p_1 \log \text{hyp.} \frac{P}{p_2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$T_2 = SL \left( P - p_2 - p_1 \log \text{hyp.} \frac{P}{p_2} \right). \quad (26)$$

Et comme  $T = T_1 - T_2$ , il vient :

$$T = SL \left( p_2 - p_1 + p_2 \log \text{hyp.} \frac{P}{p_2} - p_1 \log \text{hyp.} \frac{P}{p_1} \right) = \left. \begin{aligned} &= SL \left[ p_2 \left( 1 + \log \text{hyp.} \frac{P}{p_2} \right) - p_1 \left( 1 + \log \text{hyp.} \frac{P}{p_1} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

*Deuxième période.* — Dans la période d'avalement durant laquelle a lieu l'ascension du train dans le tube par hauteurs successives, dépendant du volume d'air avalé par la machine pneumatique, le travail  $\theta$  fait par cette dernière est égal à  $n\theta$ ,  $n$  étant le nombre de coups de piston donnés par la machine pour vider le tube, ou en d'autres termes,  $n$  étant le rapport  $\frac{V}{W}$  du volume du tube à celui des cylindres pneumatiques. De là :

$$\theta = n\theta. \quad (28)$$

Mais, dans chaque cylindre pneumatique, le travail  $\theta$ , fait à chaque course, n'est autre que celui qu'il faut exercer sur le volume  $W$  de l'air contenu dans le cylindre à la pression  $p_1$ , pour le comprimer de la pression  $p_1$  à la pression  $P$ , l'amener au volume  $w = W \times \frac{p_1}{P}$ , et l'expulser du cylindre en profitant de la contre-pression  $p_1$  qui agit toujours sur la surface du piston. Ce travail est en conséquence donné par la formule :

$$\theta = Pw \left( 1 + \log \text{hyp.} \frac{P}{p_1} \right) - p_1 W. \quad (29)$$

Et par suite

$$\Theta = n \left[ Pw \left( 1 + \log \text{hyp.} \frac{P}{p_1} \right) - p_1 W \right]. \quad (30)$$

Le travail total est ainsi  $T + \Theta$ , et si l'on suppose un rendement de 75 p. 100 à la machine, il y aura pour expression :

$$\frac{T + \Theta}{0,75}. \quad (31)$$

Enfin pour les forces  $F_1$  et  $F_2$  en chevaux-vapeur, qu'il faudra dépenser pour l'accomplissement de chaque travail  $T$  et  $\Theta$ , on aura les formules ci-après, en désignant par  $t_1$  et  $t_2$  le nombre de secondes de la période de raréfaction et des manœuvres, et par  $t_3$  celui de la période d'ascension :

$$F_1 = \frac{T}{0,75(t_1 + t_2)75,00}, \quad (32)$$

$$F_2 = \frac{\Theta}{0,75 \times t_3 \times 75,00}. \quad (33)$$

De là vient pour la force totale moyenne  $F$  :

$$F = \frac{F_1(t_1 + t_2) + F_2 \times t_3}{t_1 + t_2 + t_3}, \quad (34)$$

ou mieux sous une autre forme :

$$F = \frac{T + \Theta}{0,75 \times (t_1 + t_2 + t_3) \times 75,00}. \quad (35)$$

Les expressions (2), (16) et (41) feront connaître le temps  $t_1$  de la raréfaction qui sera déduit de la vitesse des pistons pneumatiques. On peut estimer à 60 secondes celui des manœuvres  $t_2$  qui, au moyen du tuyau d'équilibre, se feront en partie pendant la raréfaction, le train étant compris entre ses taquets d'appui et de retenue. On déterminera  $t_3$  d'après la vitesse d'ascension fixée elle-même par les équations (43) et (44).

*Cas de deux tubes conjugués.* — Avec deux tubes conjugués, les formules du travail seront les mêmes qu'avec un seul tube, dans la raréfaction et dans l'avalement. Il n'y a pour les établir qu'à tenir compte, comme cela a été exposé dans la théorie du système, des avantages résultant des limites réduites des pressions entre lesquelles agit la machine pour une même dépression.

*Première période.* — Dans la première période, il n'y aura plus, en effet, qu'à déprimer l'air de  $p_2$  à  $p_1$  en enlevant une partie de volume à  $p_2$  pour ramener l'autre partie à  $p_1$ , et ce travail se fera avec un maximum de compression de  $p_2$ , tandis qu'il fallait, dans le cas d'un seul tube, passer par la pression  $P$ .

On aura donc ainsi pour  $T$  :

$$T = Sp_2(L - x) - Sp_2x \log \text{hyp.} \frac{L}{x}. \quad (36)$$

Et comme on a pour valeur de  $x$  :

$$x = L \frac{p_2}{p_1}, \quad (37)$$

la valeur de  $T$  sera :

$$T = SL \left( p_2 - p_1 - p_1 \log \text{hyp.} \frac{p_2}{p_1} \right). \quad (38)$$

*Deuxième période.* — Il en sera de même dans la seconde période pour  $\theta = n\theta$ , et il viendra ainsi :

$$\theta = p_2w \left( 1 + \log \text{hyp.} \frac{p_2}{p_1} \right) - p_1 W, \quad (39)$$

$$\Theta = n\theta = n \left[ p_2w \left( 1 + \log \text{hyp.} \frac{p_2}{p_1} \right) - p_1 W \right]. \quad (40)$$

En comparant ces formules à celles du premier cas, on voit que  $p_2$  étant plus petit que P, et  $\frac{p_2}{p_1}$  plus petit que  $\frac{P}{p_1}$ ,  $\Theta$  sera évidemment plus petit lui-même.

La formule (32) qui donne F reste aussi sous la même forme. Il y a seulement à prendre, pour son application, les nouvelles valeurs de T et de  $\Theta$ .

Nous ajouterons à cet exposé une application des calculs aux deux cas, d'un seul tube et de deux tubes conjugués. Nous ferons cette application en prenant pour éléments du tube et du train les données (a), et nous supposerons qu'on ait affaire : 1° à une machine pneumatique  $b_1$ , à deux cylindres conjugués ayant chacun un volume W égal à 1<sup>m</sup>3,200; 2° à une machine  $b_2$  de même genre avec cylindres de chacun 7<sup>m</sup>,800.

Avec la première machine, le volume W aura une longueur l de 0<sup>m</sup>,60; avec la seconde cette longueur sera de 1<sup>m</sup>,20.

La vitesse v des pistons pneumatiques sera de 0<sup>m</sup>,60 dans l'une, et de 0<sup>m</sup>,923 dans l'autre, et de là viendra pour le temps  $t_1$  de la raréfaction exprimé en secondes :

$$t_1 = \frac{nl}{v} \tag{41}$$

On en tirera pour la section s des cylindres :

$$s = \frac{W}{l} \tag{42}$$

On en déduira aussi pour la vitesse  $\psi$  du piston du tube :

$$\psi = v \times \frac{2s}{S} \tag{43}$$

Et par suite, on aura pour le nombre de secondes  $t_3$  de l'ascension du train sur la hauteur L du tube :

$$t_3 = \frac{L}{v} \times \frac{S}{2s} = \frac{L}{\psi} \tag{44}$$

Application des calculs. Rendement du travail. — L'application des calculs donnera dans les deux machines :

P = 10.000	Q = 5.025
L = 1.000	C = 4.500
S = 2	f = + 475
$p_1$ = 5.000	f = - 250
$p_2$ = 7.612,50	$v = \begin{cases} 0,60 (b_1) \\ 0,923(b_2) \end{cases}$

Il viendra ensuite, pour les deux cas de la première machine à deux cylindres W de chacun 1<sup>m</sup>3,200 :

TUBE SIMPLE		TUBES CONJUGUÉS
	mètres.	mètres.
n =	350,532	»
l =	0,600	»
s =	2,000	»
$\psi$ =	1,200	»
$t_1$ =	350,532	»
$t_2$ =	60,000	»
$t_3$ =	833,333	»
w =	0,600	0,788
T =	2.446.809,000	1.021.464,000
$\theta$ =	4.158,8832	2.522,1216
$n\theta = \Theta$ =	6.931.472,000	4.203.536,000
F <sub>1</sub> =	106	44
F <sub>2</sub> =	148	90
F =	134	74

Et pour les deux cas de la seconde machine à cylindre de chacun 7<sup>m</sup>3,800 :

TUBE SIMPLE		TUBES CONJUGUÉS
	mètres.	mètres.
n =	54,102	»
l =	1,20	»
s =	6,50	»
$\psi$ =	6,00	»
$t_1$ =	70,333	»
$t_2$ =	60	»
$t_3$ =	166,666	»
w =	3,900	5,123
T =	2.446.809,000	1.021.464,000
$\theta$ =	27.032,740	16.393,900
$n\theta = \Theta$ =	6.931.472,000	4.203.536,000
F <sub>1</sub> =	334	139
F <sub>2</sub> =	739	448
F =	561	312

De là ressort le résumé suivant en kilogrammètres :

DÉSIGNATION de l'effet et du travail.	PAR			
	Train complet.		1 000 kilog. de houille.	
	avec un seul tube.	avec 2 tubes conjugués.	avec un seul tube.	avec 2 tubes conjugués.
Effet utile.....	4.500.000	4.500.000	1.000.000	1.000.000
Effet réel.....	9.378.281	5.225.000	2 084.062	1.161.111
Travail du moteur..	12.504.375	6.966.636	2.778.750	1.548.148

Il montre qu'à la profondeur de 1000 mètres le moteur rend 36% avec un seul tube et 64% avec deux tubes conjugués.

Extrait des *Annales des mines*, livraison de sept.-oct. 1878. Mémoire de M. Zulma Blanchet.

LÉGENDES DE LA PLANCHE

- Figures 1 et 2.
  - A, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> Tubes.
  - E..... Tuyau d'échappement.
  - a a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>... Communications avec la machine pneumatique.
  - e e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>... Communications avec l'atmosphère.
  - o..... Robinet de manœuvre avec la machine.
  - g..... Robinet de manœuvre avec l'atmosphère.
  - n..... Robinet de prise et d'échappement d'air pour les manœuvres.
  - X X.... Tuyau d'équilibre pour mettre en communication le dessus et le dessous du train.
  - s..... Robinet d'équilibre.
  - r..... Robinet de manœuvre, d'admission et d'échappement d'air.
- III..... Leviers des taquets d'appui et de retenue.
- R..... Grand registre de sûreté.
- M M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> Pistons des trains.
- Figures 5 et 6.
  - T..... Tube pneumatique.
  - CC..... Cages du service auxiliaire à câbles.
  - E..... Tuyau d'échappement.
  - G..... Compartiment d'aérage.
  - H..... Echelles.
- Figures 7 et 8.
  - TT..... Tubes conjugués.
  - CC..... Cages du service auxiliaire à câbles.
  - E..... Tuyau d'échappement.
  - H..... Echelles.