

Etudes de ventilation souterraine

par H. MARCHANDISE

Ingénieur du Corps des Mines.

SAMENVATTING

De studie van de ondergrondse ventilatie wordt door de ontginners vaak ten onrechte verwezen naar het domein der specialisten, wegens zekere theoretische moeilijkheden die ze oplevert of wegens zekere uitvoeringsmoeilijkheden.

De volledige kennis van de luchtverversing van een mijn vereist de bepaling van het debiet, de temperatuur, de vochtigheidsgraad, het gehalte aan mijngas, de ladingsverliezen in ieder deel van de luchtomlopen en ten slotte, voor de mijn in haar geheel, de depressie van de natuurlijke trek die zich, met haar teken, bij deze van de ventilatoren voegt.

Het probleem van de bepaling der ladingsverliezen en van de natuurlijke trek is het lastigst.

Uit deze bijdrage leren wij dat het mogelijk is zelfs zeer ingewikkelde problemen op te lossen, uitgaande van eenvoudige en snelle metingen die slechts drie apparaten vereisen: een anémometer, een psychrometer et een mijnbarometer. De volledige oplossing vereist evenwel tamelijk lange berekeningen die met grote nauwkeurigheid moeten uitgevoerd worden.

De investigatie-methode die in de uiteengezette praktische gevallen wordt gebruikt biedt grote voordeel toepasselijk te zijn op de meeste gevallen, namelijk bij diagonale verluchting, en zeer handelbaar te zijn.

* * *

De cijfers toenen duidelijker dan iedere commentaar dat de toegepaste methode waardevolle resultaten oplevert. Indien men aan deze methode kan verwijten aanleiding te geven tot zekere fouten, de globale fout is nochtans miniem. Om er zich rekenschap van te geven volstaat het op te merken dat er geen accumulatie van systematische fouten voorkomt, evenmin als van afleesfouten. Bij stabiel weer is de druk aan de schachtmond gemeten bij het einde der metingen dezelfde als bij de aanvang.

Men mag aannemen dat de uitslagen, indien niet streng nauwkeurig, toch ruim voldoende nauwkeurig zijn voor de praktijk.

Anderzijds, zoals reeds werd opgemerkt, is de methode uiterst praktisch en laat toe zeer complexe toestanden te benaderen, zoals degene die zich in de mijn 2 voordeden.

Wij hopen dat alle ingenieurs der mijnontginningen zich vertrouwd zouden maken met de ventilatieproblemen. De ondergrondse luchtverversing is niet alleen een der fundamentele hoofdstukken van de mijnontginning, maar haar grondige studie is tevens vol praktisch en wetenschappelijk nut.

RESUME

L'étude de la ventilation souterraine est souvent reléguée à tort, par les exploitants, au domaine des spécialistes, à cause de certaines difficultés théoriques qu'elle présente et aussi pour les difficultés de réalisation.

La connaissance complète de la ventilation d'une mine exige la détermination, dans les différentes parties des circuits d'air, des débits, des températures, de l'humidité et de la teneur en grisou de l'air, des pertes de charge et enfin, pour l'ensemble de la mine, de la dépression de l'aérage naturel, qui s'ajoute, avec son signe, à celle du ou des ventilateurs.

Les problèmes des pertes de charge et de l'aérage naturel sont les plus délicats.

Nous verrons, dans ce qui suit, qu'il est possible de résoudre des problèmes, même très complexes, à partir de mesures simples et rapides qui ne demandent que trois appareils : un anémomètre, un psychromètre et un baromètre anéroïde de mine. La résolution complète demande évidemment une masse assez considérable de calculs qui doivent être effectués avec une très grande précision.

La méthode d'investigation utilisée dans l'étude des cas pratiques exposés ci-dessous présente le grand avantage de pouvoir s'appliquer dans la plupart des cas, notamment dans le cas d'aérage en diagonale, et d'être très commode.

GENERALITES

CONSIDERATIONS SUR LA DETERMINATION DES PERTES DE CHARGE

Pertes de charge.

La perte de charge dans une conduite quelconque de longueur finie, limitée aux sections 1 et 2, répond à la formule de Bernoulli :

$$(p_1 - p_2) + \delta \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + \delta (z_1 - z_2) = b$$

où p est la pression en kg/m^2

V est la vitesse en m/sec

z est la cote

δ est le poids spécifique en kg/m^3 .

Pour les écoulements de l'air ou de fluides compressibles, on donne généralement à b , comme ci-dessus d'ailleurs, la mesure d'une pression. Il serait donc plus correct de parler de perte de pression plutôt que de perte de charge.

Dans le cas d'un fluide compressible, la formule ci-dessus n'est plus valable. On démontre facilement que, dans ce cas, la formule doit s'écrire :

$$b = (p_1 - p_2) + \frac{1}{2g} (\delta_1 V_1^2 - \delta_2 V_2^2) + \int_2^1 \delta dz$$

La perte de charge est due, soit au simple frottement sur les parois, soit à une variation de vitesse.

Dans une conduite rectiligne de section constante, la perte de charge est donnée par :

$$b = r \cdot Q^2$$

où Q est le débit en m^3/sec

r est la résistance.

Cette résistance est fonction des caractéristiques géométriques de la conduite et de sa rugosité, laquelle est mise en évidence par le coefficient de perte de charge k . On a ainsi :

$$r = k \cdot L \cdot (P/S^3)$$

où L est la longueur de la conduite

P est le périmètre de la section

S est l'aire de la section.

Aérage naturel.

La force aéromotrice de l'aérage naturel, lequel résulte de l'échauffement de l'air dans les travaux, ainsi que la dilution avec de la vapeur d'eau et du

grisou, est, en chaque section droite du circuit, la différence des pressions hydrostatiques agissant de part et d'autre de la section.

Dans une mine, l'aérage naturel dépend essentiellement de la température de l'air au jour.

Mesure et calcul des pertes de charge.

On envisage souvent la mesure directe de la perte de charge à l'aide d'un tube en U. Lorsque l'on peut disposer d'une longue tuyauterie métallique étanche, la mesure est rapide. Mais il faut pour cela vider une tuyauterie à air comprimé ou à eau, ce qui est rarement possible. On doit alors se contenter du tuyau flexible et mesurer la perte de charge dans les galeries, dans les puits, etc., de proche en proche, de 100 m en 100 m, par exemple. Cette mesure présente l'inconvénient d'accumuler les erreurs de mesure et d'être peu commode pour l'étude des puits.

La détermination de la perte de charge dans un puits, problème très délicat, peut se résoudre de différentes façons. Au lieu de mesurer directement la perte de charge dans les puits comme indiqué ci-dessus, on peut utiliser la méthode des deux puits, procédé bien connu, qui consiste à mesurer la dépression entre les puits à différents niveaux. La formule de Bernoulli permet de calculer la perte de charge globale dans les deux puits. Cette méthode ne s'applique plus lorsque les puits sont isolés comme dans le cas de l'aérage en diagonale.

Dans ce cas, lorsque la mesure directe n'est pas possible, il faut recourir à la méthode suivante :

Pour un puits, on peut écrire, avec une approximation suffisante, la formule de Bernoulli :

$$\begin{aligned} b &= \int_2^1 dp + \int_2^1 \delta \cdot dz \\ &= (p_1 - p_2) + \int_2^1 \delta \cdot dz \end{aligned}$$

où 1 et 2 représentent les extrémités du puits.

Nous poserons :

$$P = \int_2^1 \delta \cdot dz$$

et nous l'appellerons *charge hydrostatique* correspondant au tronçon compris entre 1 et 2.

Il suffit donc de deux mesures de pression absolue et tout se ramène au calcul de P.

CALCUL DES CHARGES HYDROSTATIQUES

Loi de variation de la pression en fonction de la profondeur (air sec, température constante).

Considérons une colonne d'air cylindrique de 1 m² de section. Soit p₀ la pression en kg/m² à la profondeur H. A la profondeur H + dH, la pression est p + dp, et dp = δ · dH. Le poids spécifique δ est fonction de p :

à la profondeur H $p_0 \cdot v_0 = R \cdot T_0$

à la profondeur H + dH $p \cdot v = R \cdot T$

Donc : $p \cdot v = p_0 \cdot v_0$ et $\delta = (p/p_0) \delta_0$.

D'où la loi de variation de la pression en fonction de la profondeur :

$$dp/p = (\delta_0/p_0) dH$$

En intégrant : $\ln p - \ln p_0 = (\delta_0/p_0) \cdot H$ (1)

et $P = p - p_0$

Air humide, température variable.

Il n'est pas possible d'expliciter dans la formule ci-dessus les variations de température et d'humidité. On tient compte de ces facteurs en calculant un δ'₀ fictif, à la pression p₀, à une température T_m, moyenne des températures dans le tronçon de puits envisagé, et pour un degré hygrométrique moyen φ_m.

On a alors :

$$\ln p = (\delta'_0/p_0) H + \ln p_0$$
 (2)

On écrit parfois la formule (1) de la façon suivante :

$$p = p_0 \cdot e^{H/RT_0}$$

ou, en développant en série :

$$p = p_0 [1 + \frac{1}{1} \cdot \frac{H}{RT_0} + \frac{1}{1.2} (\frac{H}{RT_0})^2 + \frac{1}{1.2.3} (\frac{H}{RT_0})^3 + \dots]$$

Pour tenir compte des températures, on écrit :

$$p = p_0 [1 + \frac{1}{1} \cdot \frac{H}{RT} + \frac{1}{1.2} (\frac{H}{RT})^2 + \frac{1}{1.2.3} (\frac{H}{RT})^3 + \dots]$$
 (3)

Dans cette formule, on ne tient pas compte de l'humidité de l'air.

Calcul rigoureux des charges hydrostatiques.

Considérons un tronçon de puits où la température varie linéairement en fonction de la profondeur. On peut donc écrire :

$$T = T_0 + k' H$$

Supposons d'abord que l'air soit sec. L'équation des gaz parfaits donne :

$$p \cdot v = R \cdot T \quad \text{ou} \quad \delta = p/(RT)$$

En différenciant cette dernière équation, on trouve :

$$d\delta = \frac{dp}{RT} - \frac{p \cdot dT}{RT^2}$$

Or $dp = \delta \cdot dH$, $p = \delta \cdot RT$, $T = T_0 + k' H$

$$\begin{aligned} \text{Donc} \quad d\delta &= \frac{\delta \cdot dH}{RT} - \frac{\delta \cdot dT}{T} \\ &= \frac{\delta \cdot dH}{R(T_0 + k' H)} - \frac{\delta \cdot k' \cdot dH}{(T_0 + k' H)} \end{aligned}$$

$$\frac{d\delta}{\delta} = (\frac{1}{k' R} - 1) \frac{d(T_0 + k' H)}{(T_0 + k' H)}$$

En intégrant entre 0 et H, on trouve :

$$\ln \frac{\delta}{\delta_0} = [\frac{1}{k' R} - 1] \ln \frac{T}{T_0}$$

ou $\delta = \delta_0 (\frac{T}{T_0})^{(\frac{1}{k' R} - 1)}$

Cette formule permet de calculer δ à une profondeur quelconque lorsque l'on connaît l'état de l'air au point supérieur (0) et la variation de la température.

Pour calculer la charge hydrostatique P correspondant à une hauteur d'air H, il suffit de faire :

$$P = \int_0^H \delta \cdot dH = \int_0^H \delta_0 \left[\frac{T_0 + k' H}{T_0} \right]^{(\frac{1}{k' R} - 1)} dH$$

Tous calculs faits, on trouve :

$$P = \delta_0 \cdot R \cdot T_0 \left[\left(\frac{T_H}{T_0} \right)^{\frac{1}{k' R}} - 1 \right]$$
 (4)

On a aussi :

$$\delta_m = \frac{1}{H} \cdot \delta_0 \cdot R \cdot T_0 \left[\left(\frac{T_H}{T_0} \right)^{\frac{1}{k' R}} - 1 \right]$$

Air humide.

Si l'air est humide, δ_0 se calcule évidemment avec le degré hygrométrique φ_0 correspondant.

D'autre part, la formule qui donne P fait intervenir la constante R. Lorsque l'air est sec, cette constante vaut 29,3 m/°K, la pression étant mesurée en kg/m², le poids spécifique en kg/m³ et la température en degrés Kelvin.

Si l'air est humide, cette constante n'est plus valable, mais il suffit de calculer une constante R' telle que $p/\delta = R'T$.

Ainsi, pour l'air saturé, nous avons déterminé huit valeurs comprises entre 29,481 et 29,505, avec une moyenne : $R = 29,491$.

Il en résulte donc que, grâce à cette constante R', la formule (4) reste rigoureuse lorsque l'air est saturé.

Si le puits est sec, le degré hygrométrique de l'air varie légèrement à cause de l'échauffement; la constante varie donc également, mais les variations sont très faibles.

Si le puits est humide et si l'air n'est pas saturé, nous remplacerons δ_0 par un δ'_0 calculé pour la pression p_0 , la température T_0 et le degré hygrométrique φ_m moyen.

La formule (4) que nous avons établie ci-dessus est donc un outil précieux et l'on peut considérer que les erreurs sur les résultats qu'elle donne sont négligeables.

Variation non linéaire de la température.

La température de l'air ne varie pas linéairement dans le puits du jour jusqu'au fond. Il suffit alors, pour calculer la charge hydrostatique totale, de transformer le diagramme des températures en une ligne polygonale aussi voisine que possible du diagramme réel et de calculer la charge hydrostatique tronçon par tronçon.

Calcul de la perte de charge dans les puits.

Si p_0 est la pression au jour et p_1 la pression au fond du puits, la perte de charge dans le puits (cas d'un puits d'entrée d'air) est donnée simplement par

$$b = p_0 + P - p_1$$

Cette méthode offre à la critique un point faible : les pressions sont mesurées au baromètre anéroïde de mine et les erreurs de lecture peuvent atteindre 0,2 mm Hg; l'erreur sur le résultat peut donc atteindre 0,4 mm Hg, soit 5,4 kg/m². Toutefois, cette valeur est un maximum. D'autre part, on peut éliminer l'erreur en faisant plusieurs déterminations dans des conditions totalement différentes; en effet, l'erreur est alors représentée par la dispersion des résultats.

Nous verrons dans le cours de cette étude que l'on peut arriver à des résultats qui concordent de manière très satisfaisante.

ETUDE APPROFONDIE DE LA VENTILATION DE DEUX CHARBONNAGES

Les deux charbonnages que nous étudions ici exploitent à grande profondeur (1100 m environ). Les différents problèmes de ventilation qui s'y posent ne seront pas envisagés explicitement, car leur résolution dépend essentiellement des programmes d'exploitation. Ces problèmes apparaissent nettement à la lecture des études qui suivent; il s'agit, par exemple, du remplacement d'un ventilateur de surface par des ventilateurs souterrains, de la modification de circuits trop résistants, de la création de nouveaux retours d'air, etc.

Les deux charbonnages en question diffèrent tous deux du schéma classique du siège constitué de deux puits, entrée d'air et retour d'air, voisins. L'aérage est en diagonale.

Le premier est relativement simple; il est aéré par un ventilateur de surface. Le second, beaucoup plus complexe, possède deux ventilateurs souterrains en parallèle.

Les retours d'air ne sont pas très grisouteux; c'est la raison pour laquelle nous ne parlerons pas du grisou.

ETUDE DU CHARBONNAGE I

Le siège étudié ci-dessous comporte deux puits : le puits d'extraction et d'entrée d'air, le puits de retour d'air. Ces deux puits sont distants de 600 m environ.

L'extraction se fait au niveau de 1114 m.

Les exploitations se divisent en deux quartiers :

— l'un à l'est des puits, au-dessus du niveau de 1114 m, comportant des chantiers dans la couche 10 Paumes;

— l'autre vers l'ouest, comportant des chantiers dans la couche Veinette, sous le niveau de 1114 m.

L'entrée d'air de ces deux quartiers est unique; elle se fait par un bouveau sud-est au niveau de 1114 m. A l'extrémité de ce bouveau, le courant d'air se divise en deux parties :

Circuit 1, comportant les chantiers dans 10 Paumes, et les galeries de retour d'air aux niveaux

de 1030 m, 923 m et 904 m jusqu'au puits de retour d'air.

Circuit 2, comportant les chantiers dans Veinette, et les galeries de retour d'air aux niveaux de 1114 m et 1093 m jusqu'au puits de retour d'air, ainsi que le tronçon de ce puits compris entre les niveaux de 1093 m et 904 m.

La ventilation est assurée par un ventilateur de surface du type Guibal, entraîné par un moteur de 225 ch, à la vitesse de 100 tours/min.

Description sommaire des puits

Puits d'entrée d'air.

Ce puits est circulaire et a un diamètre de 4 m. Son revêtement est constitué de maçonnerie de briques pour la plus grande partie, de béton armé de 1030 m à 1114 m.

diamètre, du jour à 923 m. Il contient en outre une tuyauterie d'exhaure.

Le puits est très humide; il y pleut.

Puits de retour d'air.

Le puits de retour d'air a une section variable, tantôt circulaire, tantôt ovale. Les dimensions ont été relevées tout le long du puits de 20 m en 20 m. Pour le tronçon compris entre les niveaux de 32 m et de 904 m, la section moyenne est de 6,445 m². On peut, en ne commettant qu'une erreur minime, assimiler cette section moyenne à un cercle. On trouve ainsi un diamètre de 2,86 m et un périmètre moyen de 8,98 m.

Le puits est revêtu de maçonnerie de briques, dans un état passable.

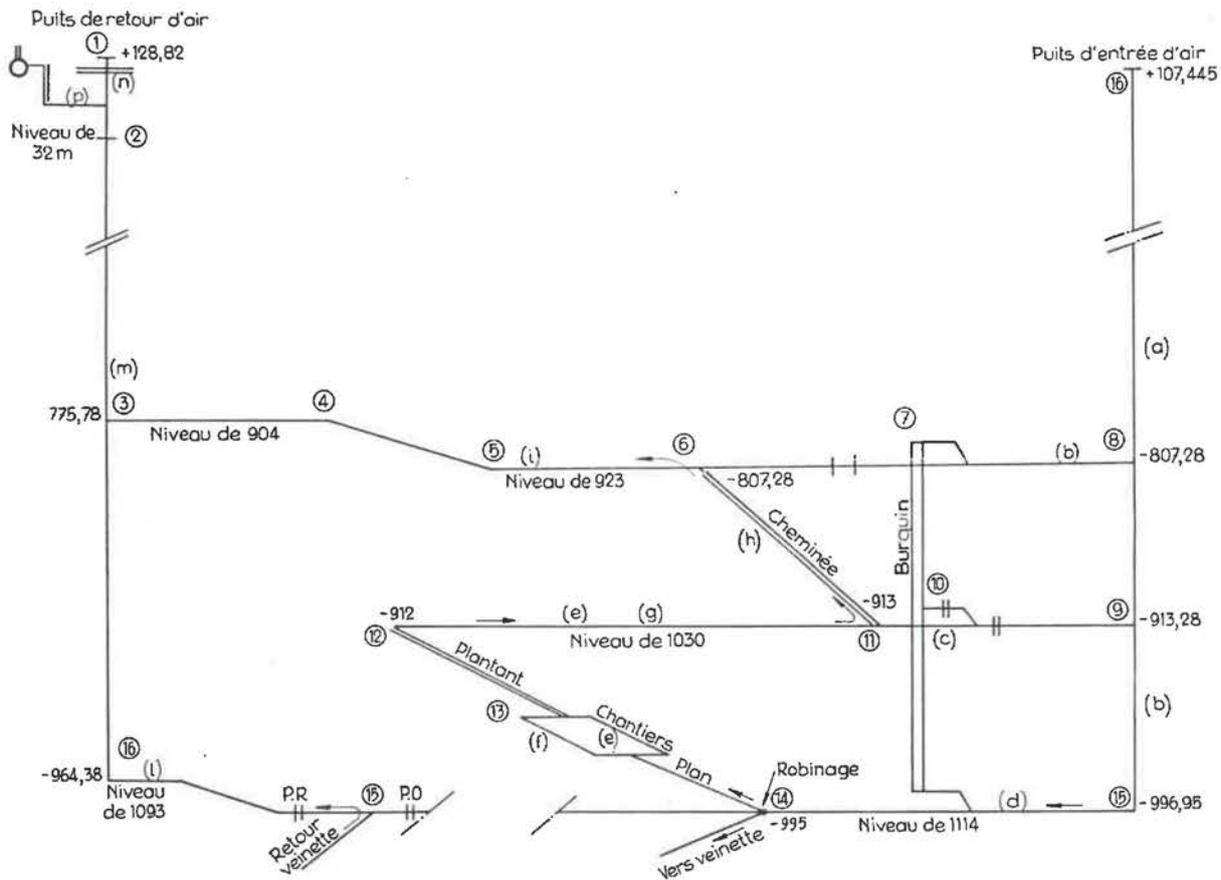


Fig. 1.

Il est équipé d'un guidonnage Briart constitué de traverses métalliques espacées de 6 m et de rails à 40 kg/m.

Dans la partie supérieure du puits subsistent des vestiges (solives et guides) d'un ancien guidonnage frontal en bois. Le puits contient également une tuyauterie à air comprimé de 200 mm de diamètre, du jour à 1114 m, et une tuyauterie de 140 mm de

Il est équipé d'un guidonnage Briart constitué de traverses métalliques espacées de 6 m et de rails à 40 kg/m.

Ce puits est très humide également.

* * *

Les mesures de ventilation ont été effectuées pendant une période de très fortes gelées, de sorte que

l'aéragé naturel sera très important. L'étude du puits d'entrée d'air a été faite en dehors de cette période.

a. Puits d'entrée d'air	26,7 m ³ /sec
b. Fuite à 923 m	3,00
c. Fuite à 1030 m	1,71
d. Bouveau sud-est à 1114 m	21
e. Taille 1	6,34
f. Taille 2	7,82
g. Retour d'air à 1030 m	14,35
h. Cheminée de 1030 m à 923 m	16,06
i. Retour général à 923 m	19,07
j. Fuite bouveau N à 1114 m	1,00
k. Retour des chantiers de Veinette	8,52
l. Retour général à 1093 m	9,55
m. Puits de retour d'air à 904 m	28,62
n. Fuite au sas	13,34
p. Débit du ventilateur	46,76

Fuites vers le puits de retour d'air :

à 630 m	2,51 m ³ /sec
à 154 m	1,12
à 32 m	1,14

PERTE DE CHARGE DANS LES PUITTS

1. — Puits de retour d'air.

Nous déterminerons la perte de charge dans le tronçon principal de ce puits, entre les niveaux de 32 m et 904 m.

Nous savons que la perte de charge est donnée par :

$$b = p_1 - (p_0 + P)$$

où p_0 est la pression au point supérieur

p_1 est la pression au fond

P est la charge hydrostatique pour le tronçon envisagé.

Nous avons vu qu'il y avait différentes façons de calculer P . A titre d'exemple, nous les appliquerons successivement.

Calcul approché.

Nous utilisons les mesures du 7 février.

Les variations de température étant faibles, supposons que nous la négligeons. Nous prenons une température constante de 16°C.

Propriétés de la vapeur d'eau à 16°C :

$$p_s = 185,3 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,01363 \text{ kg/m}^3$$

La pression p_0 mesurée est 752 mmHg, soit 10.227,2 kg/m². La pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air étant de 185,3 kg/m², on calcule facilement que le poids spécifique de l'air au niveau de 32 m est $\delta = 1,2006 \text{ kg/m}^3$.

En appliquant la formule (1) pour l'air saturé, on a :

$$\log(p_0 + P) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,2006}{10,227,2} \cdot 872 + \log(10,227,2)$$

On trouve : $p_0 + P = 11.528,8 \text{ kg/m}^2$.

D'où : $P = 1.101,6 \text{ kg/m}^2$.

La pression mesurée à 904 m est 835,8 mmHg, soit 11.366,88 kg/m².

La perte de charge est donc :

$$h = 11.366,88 - 11.528,8 = 58,08 \text{ kg/m}^2$$

Appliquons la formule (3).

$$p_0 + P = p_0 \left[1 + \frac{H}{R' T_m} + \frac{1}{1 \cdot 2} \left(\frac{H}{R' T_m} \right)^2 + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} \left(\frac{H}{R' T_m} \right)^3 + \dots \right]$$

En remplaçant T_m température moyenne par 291,5

H par 872

R' par 29,491

on trouve : $p_0 + P = 11.518,95 \text{ kg/m}^2$

Tableau I. — Mesures.

	Niveau de 32 m		Niveau de 904 m	
	Pression	Température	Pression	Température
31 janvier 1956	733 mmHg	17°C	814 mmHg	21,5°C
7 février	752	16	835,8	21
16 février	743,5	16	827	21
9 mars	747,5	17	831	21

L'écart des températures aux extrémités étant faible, nous n'avons pas relevé les températures dans le puits à des niveaux intermédiaires. Nous admettons que la variation est linéaire, ce qui est admissible dans le cas présent, comme nous le verrons plus loin.

L'air est saturé dans tout le puits; il est sursaturé dans la moitié supérieure.

et $P = 1.091,75 \text{ kg/m}^2$.

D'où la perte de charge : $h = 47,93 \text{ kg/m}^2$.

Calcul rigoureux.

L'écart de température est de 5°C.

Le facteur k' de la formule (4) vaut donc 5/872.

L'exposant vaut donc :

$$\frac{1}{k \cdot R'} = \frac{872}{5 \times 29,491} = 5,9137$$

On a donc :

$$P = 1,2006 \times 29,491 \times 289 \left[\left(\frac{294}{289} \right)^{5,9137} - 1 \right]$$

$$= 1,092,298 \text{ kg/m}^2.$$

La perte de charge est donc : $h = 47,38 \text{ kg/m}^2$.

Remarque. — On voit donc que, comme on devait s'y attendre, la première approximation, même si la variation de température est faible, est intolérable. Par contre, les formules (3) et (4) donnent à peu près le même résultat. Toutefois, la différence s'accroît lorsque la différence des températures aux extrémités du tronçon calculé est plus grande.

En calculant la perte de charge à partir de chacun des groupes de mesures données précédemment par la formule (4), on trouve :

31 janvier	$h = 40,5 \text{ kg/m}^2$
7 février	47,38
16 février	50,6
9 mars	52,6

Moyenne	$h = 47,8 \text{ kg/m}^2$
---------	---------------------------

Mesure directe de la perte de charge.

Une tuyauterie à air comprimé a pu être mise hors service pour effectuer cette mesure. Elle a été maintenue ouverte à ses deux extrémités (à 32 m et à 904 m) pendant plus de 24 heures, de façon qu'elle se mette en équilibre de température avec le courant d'air.

Un tube en U, branché sur la tuyauterie au niveau de 904 m, a marqué une différence de pression de 47 à 48 mm d'eau.

On peut donc être satisfait du résultat des calculs.

Remarque. — On peut calculer facilement que la correction à apporter à la mesure directe, résultant de la différence des régimes de pressions dans la tuyauterie et dans le puits, est très faible et négligeable.

Calcul de la résistance et du coefficient de perte de charge du puits de retour d'air.

La perte de charge dans une conduite est donnée par :

$$h = r \cdot Q^2 \quad \text{avec} \quad r = k \cdot L \cdot (P/S^3)$$

Débits. — Le débit dans le puits à 904 m est de 28,6 m³/sec, composé de 9,55 m³/sec venant de 1093 et de 19,07 m³/sec venant de 904. Il s'y ajoute, au niveau de 630 m, un débit de fuite de 2,51 m³/sec et, à 154 m, un débit de 1,12 m³/sec.

Détermination de k .

$$h = 48 = k \frac{8,98}{(6,445)^3} [274 \times (28,62)^2$$

$$+ 476 \times (31,13)^2 + 122 \times (32,25)^2]$$

On trouve que : $k = 0,001774$.

Résistance du puits, de 32 m à 904 m :

$$r = 0,05188 \text{ kilomurgue.}$$

2. — Puits d'entrée d'air.

La détermination de la perte de charge d'un puits d'entrée d'air isolé, équipé d'une tuyauterie à air comprimé qui ne peut être mise hors service, est très délicate. Il est indispensable, pour arriver à des résultats cohérents, de faire un relevé complet des températures dans le puits.

A ces difficultés se sont ajoutées des difficultés pratiques. Le puits d'entrée d'air étant le seul puits utile du siège (extraction, descente de matériel, etc.), il est difficile de l'immobiliser pendant plusieurs heures pour exécuter les mesures de températures.

Aussi ne calculerons-nous qu'une seule valeur certaine, laquelle se confirme de façon assez satisfaisante par des déterminations approximatives.

* * *

La perte de charge est déterminée pour le puits considéré dans son entièreté, du jour à 1114 m.

Le relevé des températures est donné par la figure 2. Il est important de remarquer que la durée

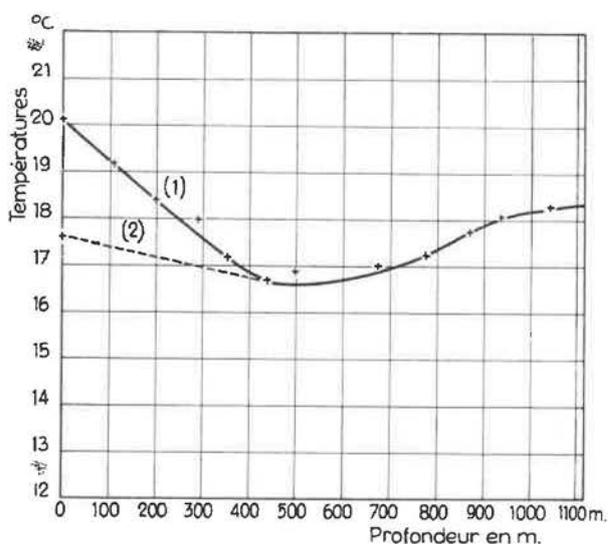


Fig. 2.

des mesures ayant été de 3 heures, la température au jour a varié au cours des mesures. De 20,2° au début des mesures, elle est tombée à 17,6° à la fin des mesures. Il en résulte que, pour le calcul, il faut utiliser non pas la courbe (1), mais la courbe (2).

Les mesures de pression au fond et au jour sont prises à quelques minutes d'intervalle.

Au jour : 744,2 mm Hg.

Au fond : 846,0 mm Hg.

A la recette, les températures sèches et humides sont respectivement les suivantes :

$$t_s = 17,6^\circ \quad t_h = 13,1^\circ$$

On calcule facilement que le degré hygrométrique est 79 %.

A 1114 m, on a : $t_s = 18,3^\circ$ et $t_h = 17,8^\circ$.

Le degré hygrométrique : $\varphi = 96 \%$.

D'après le diagramme, on voit que l'on peut diviser la colonne d'air, dont il faut calculer le poids, en deux tronçons : du jour à 700 m, de 700 m à 1114 m.

a) Du jour à 700 m.

Les variations de température étant très faibles, nous prendrons la température moyenne : 17°C .

Nous supposons également que le degré hygrométrique augmente linéairement à partir de 79 % jusqu'à 100 % au niveau de 700 m (cas de la formule 2).

Propriétés de la vapeur d'eau.

A $17,6^\circ\text{C}$, $p_s = 205,2 \text{ kg/m}^2$

A 17°C , $p_s = 197,5 \text{ kg/m}^2$

$v_s = 69,10 \text{ m}^3/\text{kg}$

et $\delta_s = 0,0145 \text{ kg/m}^3$.

Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air :

au jour : $205,2 \times 0,79 = 162,1 \text{ kg/m}^2$

à 700 m : $197,5 \text{ kg/m}^2$

En moyenne, nous prendrons : $179,8 \text{ kg/m}^2$.

Poids spécifique de l'air : $\delta'_0 = 1,18395 \text{ kg/m}^3$.

La charge hydrostatique se calcule comme suit :

$$\log (p_0 + P_1) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,18395}{10,121,1} \cdot 700$$

$$+ \log (10,121,1)$$

On trouve : $p_0 + P_1 = 10,984,72 \text{ kg/m}^2$.

Donc : $P_1 = 863,62 \text{ kg/m}^2$.

b) De 700 m à 1114 m.

La variation de température étant relativement faible, nous ferons le calcul d'après la formule (2) comme pour le premier tronçon.

Température moyenne : $17,7^\circ\text{C}$.

Degré hygrométrique : 100 %.

Vapeur d'eau à $17,7^\circ\text{C}$: $p_s = 206,5 \text{ kg/m}^2$ et $\delta_s = 0,0151 \text{ kg/m}^3$.

Poids spécifique de l'air à 700 m :

$$\delta = 1,2813 \text{ kg/m}^3$$

La charge hydrostatique se calcule comme précédemment :

$$\log (p'_0 + P) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,2813}{10,984,72} \cdot 415$$

$$+ \log (10,984,72)$$

$$p'_0 + P_2 = 11,526,95 \text{ kg/m}^2$$

c) Charge hydrostatique totale.

$$11,526,95 - 10,121,1 = 1,405,85 \text{ kg/m}^2$$

La pression mesurée à 1114 m est 846,0 mm Hg, soit $11,505,6 \text{ kg/m}^2$.

Perte de charge dans le puits :

$$h = 11,526,95 - 11,505,6 = 21,35 \text{ kg/m}^2$$

Comme nous l'avons dit précédemment, il n'a pas été possible de mesurer des températures à des niveaux intermédiaires. A défaut de mieux, nous ferons les calculs en supposant que la température augmente linéairement avec la profondeur, mais dans la critique des résultats nous pourrions dire que les valeurs de perte de charge trouvées seront systématiquement trop élevées. En effet, plus l'air entrant est froid, plus rapidement il s'échauffe dans la moitié supérieure du puits.

De plus, pour simplifier les calculs, nous supposons que l'air est sec, approximation admissible parce que les mesures ci-dessus ont été exécutées pendant une période de forte gelée, mais introduisant une erreur supplémentaire par excès.

Mesures du 7 février.

Poids spécifique de l'air au jour : $1,293 \text{ kg/m}^3$.

$$\text{On a : } \frac{1}{k \cdot R} = \frac{1113}{12 \times 29,3} = 3,163$$

$$P = 1,293 \times 29,3 \times 273 \left[\left(\frac{285}{273} \right)^{3,163} - 1 \right]$$

$$= 1,506,88 \text{ kg/m}^2$$

Perte de charge : $28,56 \text{ kg/m}^2$.

Tableau II. — Mesures.

	A la recette		A 1114 m	
	Pression	Température	Pression	Température
7 février	760,5 mm Hg	0°C	869,2 mm Hg	12°C
5 mars	749,2	4,5	855,5	14

Déterminations approchées.

Mesures du 5 mars.

Poids spécifique de l'air au jour : 1,254 kg/m³.

$$\text{On a : } \frac{1}{k \cdot R} = \frac{1113}{9,5 \times 29,3} = 4,005$$

$$P = 1,254 \times 29,3 \times 277,5 \left[\left(\frac{284}{277,5} \right)^{4,005} - 1 \right] \\ = 1,470,3 \text{ kg/m}^2$$

Perte de charge : 24,62 kg/m².

Calcul de la résistance du puits et du coefficient de perte de charge.

Tableau III.

	Longueur	Débit
De 0 à 725 m	715,5 m	29,2 m ³ /sec
De 725 à 923 m	199,7	26,7
De 923 à 1030 m	106	23,7
De 1030 à 1114 m	84	21

Périmètre de la section du puits : 12,56 m.

Aire de section : 12,56 m².

En procédant comme pour le puits de retour d'air, on trouve : $k = 0,003967$.

Résistance :

$$r = k (PL/S^2) = 0,028014 \text{ kilomurgue.}$$

ETUDE DU CIRCUIT 1.

1. Galeries de retour d'air de 923 à 904 m. (entre 6 et 3).

(3) Envoyage de 904 :

$$p = 835,8 \text{ mm Hg} \quad t = 21^\circ\text{C}$$

(6) Sommet cheminée de 1030 :

$$p = 843 \text{ mm Hg} \quad t = 23^\circ\text{C}$$

Cotes : envoyage 904 : — 775,78 m
sommet cheminée de 1030 : — 807,28 m
31,50 m

Degré hygrométrique moyen : $\varphi = 30 \%$

Remarque. — Les mesures ont été effectuées pendant une période de fortes gelées; l'air entre très froid et très sec dans le puits. Le degré hygrométrique à l'envoyage de 1114 m (entrée d'air) était de 70 %.

Il n'y a donc rien d'anormal à avoir de l'air aussi sec dans les retours d'air, les travaux eux-mêmes étant très secs.

Pour le calcul de la charge hydrostatique et de la perte de charge dans ce tronçon de circuit, on peut se contenter d'utiliser un poids spécifique moyen.

Température moyenne : 22°C.

Pression moyenne : 839,4 mm Hg
ou 11,415,84 kg/m².

Pression partielle de vapeur d'eau : 80 kg/m².

Poids spécifique de l'air : 1,3183 kg/m³.

Charge hydrostatique :

$$1,3183 \times 31,5 = 41,52 \text{ kg/m}^2$$

Perte de charge :

$$(843 - 835,8) \times 13,6 - 41,52 = 97,92 - 41,52 \\ = 56,40 \text{ kg/m}^2$$

2. Cheminée de 1030 à 923.

(6) à 923 $p = 843 \text{ mm Hg} \quad t = 23^\circ\text{C}$

(11) à 1030 $p = 855,2 \text{ mm Hg} \quad t = 25^\circ\text{C}$

Différence de cotes : 106 m.

Degré hygrométrique : $\varphi = 30 \%$.

Pression partielle de vapeur d'eau à 23°C :

$$p_v = 85,6 \text{ kg/m}^2$$

Poids spécifique de l'air à 923 : 1,3191 kg/m³.

En appliquant la méthode de calcul rigoureuse, on trouve :

$$P = 140,47 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge :

$$(855,2 - 843) \times 13,6 - 140,47 = 25,30 \text{ kg/m}^2.$$

3. Bouveau de retour d'air à 1030 m (entre 11 et 12).

La perte de charge est de 21,7 mm H₂O.

4. Chantiers dans 10 Paumes.

Le circuit compris entre le robinage de 1114 m (14) et la tête du bouveau plantant à 1030 m (12) se décompose en deux parties :

— du robinage au pied du bouveau plantant, où la température varie de 14° à 26,5°C;

— du pied du bouveau plantant au sommet de celui-ci, où la température est constante.

Mesures :

(12) $p = 856,7 \text{ mm Hg} \quad t = 26,5^\circ\text{C}$

(14) $p = 868,2 \text{ mm Hg} \quad t = 14^\circ\text{C}$

Degré hygrométrique de l'air en (14) $\varphi = 60 \%$
en (12) $\varphi = 35 \%$

Cotes :

(12) sommet du plantant à 1030 : — 912 m

(13) pied du plantant — 954 m

(14) robinage de 1114 m — 995 m

a) Bouveau plantant.

La pression partielle de la vapeur d'eau étant de 106 kg/m², on calcule facilement que le poids spécifique de l'air à 1030 m est :

$$\delta = 1,32705 \text{ kg/m}^3.$$

Pour le calcul de la charge hydrostatique, il suffit d'appliquer la formule (1) puisque la température est constante.

$$\log (p_0 + P) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,32705}{11.651,12} \cdot 42 + \log (11.651,12)$$

On trouve : $p_0 + P = 11.707,15 \text{ kg/m}^2$

d'où : $P = 56,03 \text{ kg/m}^2$.

Remarque. — Pour le calcul de l'aérage naturel, le P à utiliser sera moindre; en effet, la cote du pied de la cheminée est — 915 m. On prendra donc $P' = 56,03 - 1,33 = 54,70 \text{ kg/m}^2$.

Il est utile de noter également que si, au lieu de tenir compte du degré hygrométrique de 35 %, on faisait les calculs en supposant que l'air fût sec, on trouverait que :

$$P' = 54,67 \text{ kg/m}^2.$$

Des mesures partielles ont montré, tous calculs effectués, que la perte de charge dans le bouveau plantant est d'environ 21 kg/m^2 .

b) *Tronçon inférieur.*

Pour les calculs, nous prendrons comme point de départ le robinage de 1114 m. Il faut alors modifier les formules. On démontre facilement que si δ_0 est le poids spécifique de l'air au point inférieur,

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\left(\frac{1}{k' R'} + 1 \right)}$$

en un point quelconque situé à un niveau supérieur, par exemple au pied du plantant.

Dans ce cas, l'exposant a la valeur suivante :

$$\frac{1}{k' R'} + 1 = \frac{41}{13 \times 29,491} + 1 = 1,10694$$

Donc : $\delta_1 = \delta_0 \left(\frac{287}{299,5} \right)^{1,10694}$

La pression partielle de vapeur d'eau dans l'air à 1114 m étant de 97,7 kg/m^3 , on trouve que le poids spécifique de l'air est 1,40065 kg/m^3 .

On a donc :

$$\delta_1 = 1,401 \left(\frac{287}{299,5} \right)^{1,10694} = 1,333 \text{ kg/m}^3$$

Poids spécifique moyen pour le tronçon envisagé :

$$\frac{1}{2} (1,401 + 1,333) = 1,367 \text{ kg/m}^3.$$

Charge hydrostatique : $1,367 \times 41 = 56,047 \text{ kg/m}^2$.

c) *Calcul des pertes de charge.*

La charge hydrostatique totale vaut :

$$56,03 + 56,05 = 112,08 \text{ kg/m}^2.$$

Les pressions mesurées aux bornes sont respectivement 11.651,12 kg/m^2 à 1030 et 11.807,52 kg/m^2 à 1114 m.

La perte de charge totale du circuit vaut donc :

$$11.807,52 - (11.651,12 + 112,08) = 44,32 \text{ kg/m}^2.$$

5. *Perte de charge dans le bouveau principal de 1114 m.*

Différence de pression mesurée : 1 mm Hg.

La perte de charge est donc :

$$13,6 - 2(1,4) = 10,8 \text{ kg/m}^2.$$

Galerie du ventilateur.

La « galerie » du ventilateur se compose d'un petit tronçon plat au niveau de 19 m, à angle droit par rapport au puits, suivi d'un burquin de 15 m et d'une galerie horizontale (fig. 3). Les galeries sont bétonnées.

Le ventilateur refoule dans une cheminée de section rectangulaire de 2,40 m \times 2,10 m.

Cette cheminée s'élève jusqu'à un niveau situé environ 4 m plus haut que celui de la recette du puits de retour d'air.

Les pertes de charge dans la galerie sont principalement dues aux trois coudes à angle droit successifs.

On constatera que l'air montant du puits subit deux changements de direction très rapprochés : du puits dans la galerie horizontale et de celle-ci dans le burquin. Pour cette raison, il n'est pas possible de mesurer séparément la perte de charge subie au passage du puits dans la galerie. Dans le petit tronçon de galerie au niveau de 19 m, le courant d'air est essentiellement turbulent. On ne peut donc s'y placer en station pour faire des mesures de différence de pression à l'aide d'un tube en U. Nous avons d'ailleurs vérifié que les mesures effectuées ainsi sont tout à fait aberrantes.

Nous n'avons donc mesuré que la perte de charge globale dans les trois coudes à l'aide d'un tube en U placé dans la galerie supérieure et raccordé à un tuyau flexible ouvert dans le puits à un niveau situé 6 m plus bas que celui de la galerie inférieure.

Perte de charge : 25 mm d'eau.

Charges hydrostatiques du niveau de 32 m au jour.

a) *de 32 à 19 m.*

Poids spécifique de l'air : 1,19 kg/m^3 .

Charge : $1,19 \times 13 = 15,47 \text{ kg/m}^2$.

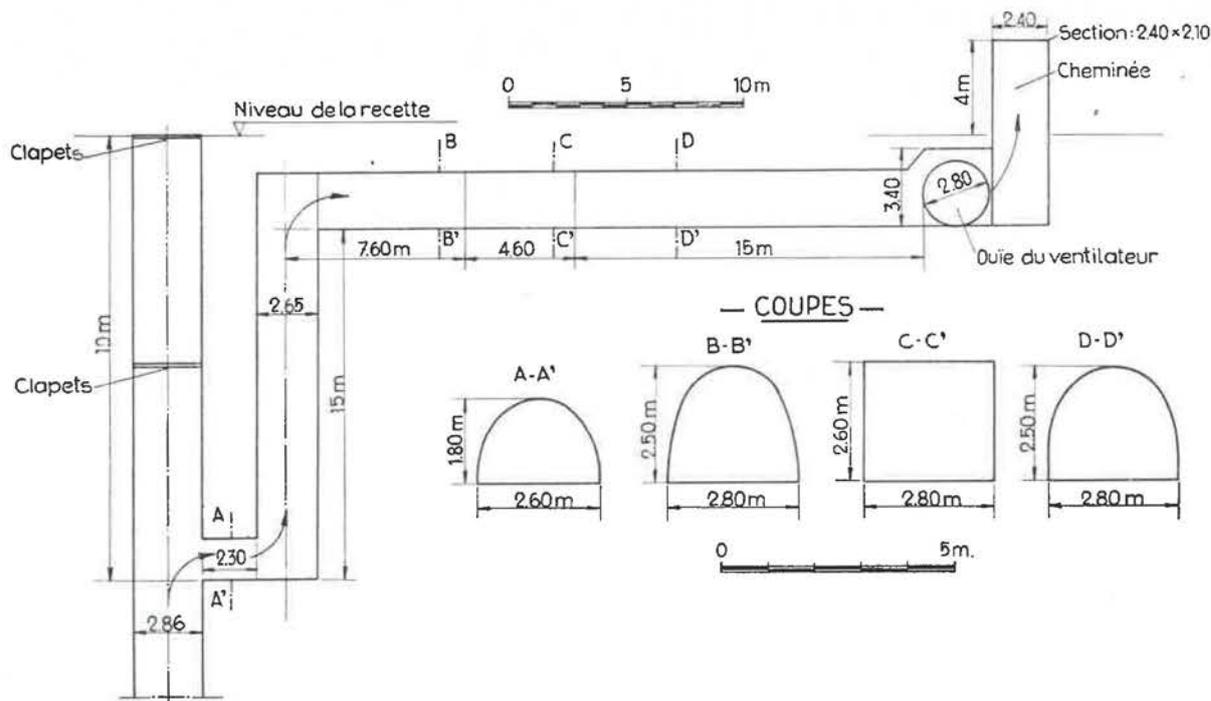


Fig. 5.

b) de 19 m au jour.

Nous prenons comme niveau supérieur celui de la recette du puits, lequel correspond à peu près à celui de la sortie du ventilateur. Nous négligeons la hauteur de la cheminée (4 m) parce qu'il n'est pas possible d'y faire des mesures.

Pression à l'entrée de la galerie du ventilateur : 10.200 kg/m² environ.

Pression avant le ventilateur : 10.151 kg/m².

Température : 10°C environ.

Pression partielle de vapeur d'eau : 125,1 kg/m² (air saturé).

Poids spécifique moyen de l'air : 1,2224 kg/m³.

Charge hydrostatique : $1,2224 \times 19 = 23,23$ kg/m².

Perte de pression à la sortie de la cheminée.

En l'absence de ventilateur, la pression au jour (reconstituée) serait :

$$10.227,2 - 15,47 - 23,23 - 25 = 10.163,51 \text{ kg/m}^2$$

Le ventilateur fournit une dépression de 165 mm d'eau. Donc la pression au jour devrait être :

$$10.163,5 + 165 = 10.328,5 \text{ kg/m}^2.$$

La pression réelle est de 759 mm Hg, soit 10.322,4 kg/m².

La différence (6,1 kg/m²) correspond à la perte sous forme d'énergie cinétique à l'échappement.

Évaluation géométrique des pertes de charge.

Il est intéressant de comparer la valeur précédente de la perte de charge avec les résultats obtenus par calcul à partir de la formule :

$$b = \alpha \frac{V^2}{2g} \delta$$

donnant la perte de charge dans les coudes.

Le trajet de l'air dans la galerie proprement dite comporte deux coudes à 90°.

Le débit d'air passant dans la galerie est de 46,76 m³/sec.

a) La perte de charge à l'entrée de la galerie, au niveau de 19 m, n'est pas calculable.

b) *Coude inférieur dans la galerie.*

Section de la galerie horizontale inférieure : 3,76 m².

Vitesse de l'air : $46,76/3,76 = 12,4$ m/sec.

$$h = (155/19,62) \times 1,22 = 9,64 \text{ mm H}_2\text{O}.$$

c) *Coude supérieur.*

Diamètre du burquin : 2,65 m.

Section du burquin : 5,5 m².

Vitesse de l'air : $46,76/5,5 = 8,5$ m/sec.

$$h = (72,25/19,62) \times 1,22 = 4,5 \text{ mm H}_2\text{O}.$$

Perte de charge totale : 14,14 mm H₂O.

e) *Perte de pression sous forme d'énergie cinétique à la sortie de la cheminée.*

Section : 5,04 m².

Vitesse de l'air : 9,27 m/sec.

Perte de pression :

$$(986/19,62) \times 1,24 = 5,45 \text{ mm H}_2\text{O}.$$

La concordance avec les pertes de charge mesurées et trouvées peut être considérée comme très satisfaisante.

Aérage naturel (Circuit n° 1).

La force aéromotrice de l'aérage naturel est la différence entre les charges hydrostatiques côté entrée et côté retour.

Les orifices d'entrée et d'échappement n'ayant pas la même cote, une correction doit être calculée.

Cote recette du puits de retour : + 128,22 m
 Cote recette du puits d'entrée : + 116,05 m
 Différence : 12,17 m

Correction tenant compte des altitudes :
 $1,293 \times 12,17 = 15,7 \text{ kg/m}^2$.

journee pendant laquelle les conditions atmosphériques furent semblables à celles du 7 février. La pression atmosphérique à la recette du puits d'entrée d'air était de 741 mm Hg.

En gros, les pressions mesurées sont données par la figure 4. La dépression donnée par le ventilateur était de 160 mm d'eau.

Perte de charge de l'ensemble des chantiers.

La différence de pression entre les points (14) et (15) donne une valeur approximative de la perte de charge dans les chantiers. Pour avoir la perte de

Tableau IV

	Poids d'air	Pertes de charge
Puits d'entrée d'air	1.499,67 kg/m ²	21,35 kg/m ²
Correction d'altitude	15,7	—
Bouveau de 1114 m	—	10,8
Chantiers de 10 Paumes	110,75	44,32
Bouveau de 1030 m	—	21,70
Cheminée 1030-923	140,47	25,30
Retour d'air 923-904	41,52	56,40
Puits de retour d'air	1.092,30	48,00
Idem de 32 à 19 m	15,47	—
Coude à 19 m	—	—
Galerie du ventilateur	23,23	25
Echappement	—	6,1
Somme des charges entrée d'air	+ 1.515,37	258,97 kg/m ²
Somme des charges retour d'air	— 1.423,74	
Aérage naturel	91,63 kg/m ²	

Force aéromotrice totale, ventilateur + aérage naturel :

$$165 + 91,63 = 256,63 \text{ kg/m}^2$$

Pertes de charge : 258,97 kg/m².

On obtient donc une très bonne concordance de la somme des pertes de charge avec la force aéromotrice totale. Il importe toutefois de remarquer qu'il y a une légère erreur de fermeture. En effet, la pression mesurée à la recette du puits de retour d'air est de 759 mm Hg; la correction d'altitude pour les puits est de 15,7 kg/m², soit 1,155 mm Hg. La pression à la recette du puits d'entrée d'air devrait être de 760,16 mm Hg, au lieu de 760,5. L'erreur de fermeture est de 4,7 kg/m². Elle est due, soit aux erreurs de lecture, soit à une légère variation de la pression atmosphérique, hypothèse très plausible, la durée des mesures au fond étant de quatre heures environ.

ETUDE DU CIRCUIT 2.

Les mesures servant au calcul des pertes de charge dans ce circuit ont été effectuées le 31 janvier 1956,

charge exacte, il faudrait ajouter, à la différence de pression ci-dessus, la force aéromotrice de l'aérage naturel qui existe dans l'ensemble du chantier entre les points (14) et (15).

La perte de charge apparente vaut donc :

$$1,3 \text{ mm Hg} + \text{poids correspondant à 1 m d'air} \\ (\delta = 1,43 \text{ kg/m}^3), \text{ soit } 19,1 \text{ kg/m}^2$$

Perte de charge due aux portes régulatrices à 1114 m

$$(844 - 836) \times 13,6 = 108,8 \text{ kg/m}^2$$

Perte de charge dans les boueaux de retour d'air de 1114 et 1093 m (de 15 à 16).

Pression moyenne :

$$843 \text{ mm Hg, soit } 11,342,4 \text{ kg/m}^2$$

Température : 27°C.

Poids spécifique de l'air : 1,292 kg/m³.

Charge hydrostatique : $1,292 \times 33 = 42,64 \text{ kg/m}^2$

Perte de charge :

$$(836 - 832) \times 13,6 - 42,64 = 11,8 \text{ kg/m}^2$$

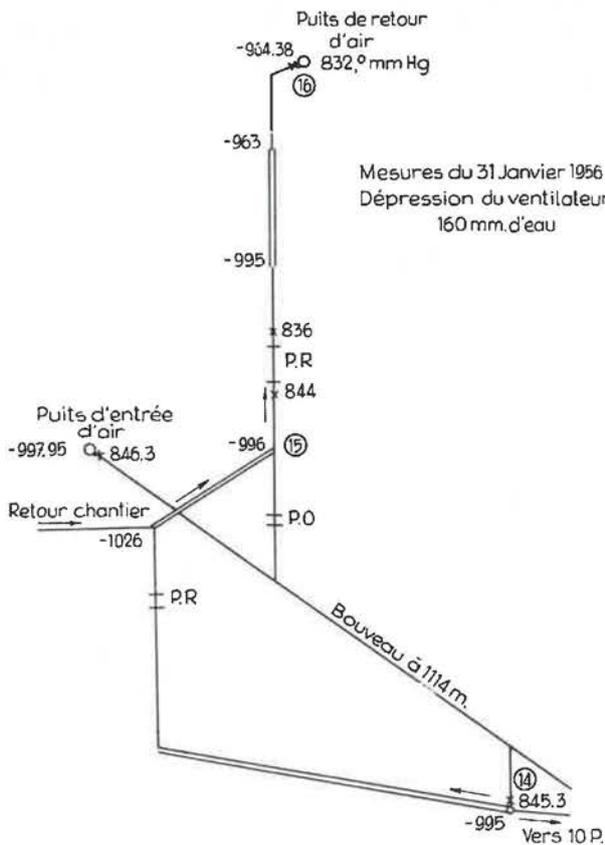


Fig. 4.

Perte de charge dans le puits de retour d'air entre 1093 et 904 m.

Hauteur du tronçon du puits : 189 m.

Section moyenne : 6,72 m².

Périmètre : 9,16 m.

Coefficient de perte de charge : 0,001774.

$$h = 0,001774 \cdot [9,16 / (6,72)^3] \cdot 189 \cdot (9,55)^2 = 0,92 \text{ kg/m}^2.$$

On peut également calculer la perte de charge à partir des mesures de pression. On trouve 2,7 kg/m² (voir calcul de la charge hydrostatique ci-dessous).

Il est plus logique de considérer que la perte de charge dans ce tronçon de puits est de 1 mm d'eau, le chiffre de 2,7 kg/m² étant l'ordre de grandeur des erreurs de lecture au baromètre.

Aérage naturel (Circuit n° 2).

L'aérage naturel que nous envisageons est celui qui existe dans le circuit puits d'entrée d'air, les bouvoux nord à 1114 et 1093, le puits de retour d'air. L'aérage naturel existant dans les chantiers en défoncement est négligé.

Puits de retour d'air (tronçon de 1093 à 904 m).

Pression à 904 : 814 mm Hg; température 21°C

Pression à 1093 : 832 mm Hg; température 24°C

L'air est pratiquement saturé. A la température moyenne de 22,5°C, la pression partielle de la vapeur d'eau est de 277 kg/m².

Le poids spécifique de l'air à 904 est :

$$\delta = 1,267 \text{ kg/m}^3.$$

La charge hydrostatique calculée d'après la formule (2) est : 242,08 kg/m².

Aérage naturel au 31 janvier.

Retours d'air

Galerie du ventilateur :	22,6 kg/m ²
Puits de 19 à 32 :	15,07
Puits de 32 à 904 :	1.053,60
Puits de 904 à 1093 :	242,08
Galeries 1093 à 1114 :	42,64

1.375,99 kg/m².

Entrée d'air

Puits d'entrée d'air :	1.453,43 kg/m ²
Correction d'altitude :	15,3

1.468,73 kg/m².

Aérage naturel :

$$1.468,73 - 1.375,99 = 92,74 \text{ kg/m}^2.$$

Force aéromotrice totale :

Ventilateur	160
Aérage naturel	92,74

252,74 kg/m².

Force aéromotrice disponible pour le circuit n° 2.

La force aéromotrice disponible vaut la force aéromotrice totale diminuée des pertes de charge dans les circuits communs.

Puits de retour d'air	48 kg/m ²
Galerie du ventilateur	25
	6,1
Puits d'entrée d'air	21,35
Bouvoux de 1114 m	10,8

111,25 kg/m².

La force aéromotrice disponible est donc :

$$252,74 - 111,25 = 141,49 \text{ kg/m}^2.$$

Somme des pertes de charge dans le circuit n° 2.

Chantier	19,1
Portes régulatrices	108,8
Bouvoux de retour	11,8
Puits de 1093 à 904	1

140,7 kg/m².

CHARBONNAGE II

Le charbonnage II exploite également à grande profondeur; il extrait à deux étages : 1060 m et 1160 m.

Il possède quatre puits :

- le puits n° 1 qui dessert l'étage de 1060 m et constitue l'entrée d'air de cet étage;
- le puits n° 2 qui est le puits d'extraction et d'entrée d'air pour l'étage de 1160 m;
- le puits n° 3, puits tout à fait secondaire, qui ne sert qu'à l'exhaure;
- le puits n° 4, retour d'air général.

Les puits 1 et 2 sont voisins (distants de 25 m), le puits de retour se trouve à 600 m au nord des puits d'entrée d'air.

Description sommaire des puits.

Puits n° 1.

Le puits n° 1 est creusé à la profondeur de 1070 m environ. Sa section est assez régulière; elle est ovale jusqu'au niveau de 870 m environ, à peu près circulaire sous ce niveau. En moyenne, les dimensions des sections sont les suivantes :

section ovale : petit axe de 2,65 m, grand axe de 4,10 m,

grande section (sous 870) : petit axe de 4,00 m, grand axe de 4,50 m.

Le puits est maçonné sur toute sa hauteur; la maçonnerie, en briques, est en bon état.

Il est légèrement humide dans les 150 m supérieurs et ensuite très sec jusqu'au fond.

Le puits est équipé d'un guidonnage latéral en bois. Les traverses en bois sont espacées de 1,33 m.

Le puits contient deux tuyauteries à air comprimé de 180 mm de diamètre, du jour jusqu'au niveau de 950 m. Sous ce niveau, une seule tuyauterie descend jusqu'à 1060 m.

Le puits contient en outre trois câbles électriques et un câble téléphonique.

Puits n° 2.

Le puits n° 2 est à peu près identique au puits n° 1 en ce qui concerne le guidonnage. Les sections sont les mêmes, sauf qu'elles sont un peu rétrécies vers 200 et 400 m.

Le puits est maçonné. Il est entièrement sec.

Il ne contient qu'une tuyauterie à air comprimé de 950 m à 1160 m.

Il contient deux câbles électriques depuis le niveau de 841 jusqu'à 1160 m.

Puits n° 3.

Le puits n° 3 est circulaire et a un diamètre moyen de 2,50 m. Il est revêtu de maçonnerie de briques de 180 m à 356 m, le reste est à terres nues. Le puits est humide.

Le puits est équipé d'un guidonnage frontal en bois.

Puits n° 4.

Ce puits est creusé à la profondeur de 965 m. Sa section est irrégulière, ovale, parfois rectangulaire, parfois fortement allongée.

La section moyenne, calculée d'après des relevés effectués tous les 100 m, est de 8,01 m².

Le puits est en partie à terres nues, en partie en maçonnerie de briques. Il est entièrement maçonné sous 500 m. Cette maçonnerie est parfois en assez mauvais état.

Le puits est équipé d'un guidonnage latéral en bois.

Le puits est très humide; il y pleut.

L'air sort librement du puits à la recette.

PRINCIPE DE LA VENTILATION

Le siège comporte deux circuits d'aéragage principaux :

- le circuit n° 1, constitué par le puits n° 1 et l'étage de 1060 m, jusqu'au niveau de 965 m du puits de retour d'air;
- le circuit n° 2, constitué par le puits n° 2 et l'étage de 1160 m, jusqu'au niveau de 965 m du puits de retour d'air.

Dans chaque circuit, la circulation de l'air est assurée par un ventilateur (Aérex). Les deux circuits ont une issue commune, le puits de retour.

Les deux aérex sont installés au niveau de 965 m, à proximité du puits de retour d'air. Ils répondent aux caractéristiques suivantes :

Aérex n° 1.

Commande directe par moteur asynchrone de 32 ch - Vitesse : 1.470 t/minute.

Diamètre de la roue : 1.049 mm.

Nombre de pales : 15.

Fournit un débit de 11,48 m³/sec sous une dépression de 144 kg/m².

Aérex n° 2.

Commande par moteur asynchrone de 125 ch avec transmission par courroies trapézoïdales.

Diamètre de la roue : 1.436 mm.

Nombre de pales : 16.

Fournit un débit de 20 m³/sec sous une dépression de 353 kg/m².

Les caractéristiques de fonctionnement sont données par les figures 11 et 12.

* * *

L'entrée d'air du circuit n° 1 présente une singularité. Le puits n° 1 est en effet en communica-

tion directe, au niveau de 356 m, avec le puits n° 3. Le régime des températures dans les deux puits est tel que le véritable puits d'entrée d'air est le puits n° 3.

L'air entre donc par ce puits et arrive au puits n° 1 au niveau de 356 m où il se divise en deux courants : une partie de l'air remonte dans le puits n° 1 jusqu'au jour, le reste descend. Nous avons donc un circuit auxiliaire que nous appellerons circuit n° 3 (puits n° 3 et n° 1, et communication à 356 m).

Cette singularité est due principalement à la présence des tuyauteries à air comprimé dans le puits n° 1.

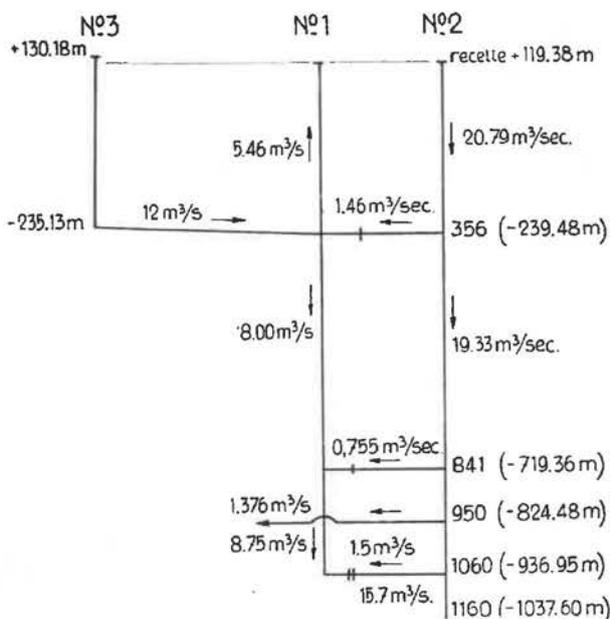


Fig. 5.

Le puits n° 2 est, sur toute sa hauteur, en surpression par rapport au puits n° 1, de sorte qu'il y a plusieurs fuites, du n° 2 vers le n° 1; les principales fuites se trouvent aux niveaux de 356, 841, 950 et 1060 m.

DEBITS

Circuit 2.

a. Entrée d'air générale à 1160 m	15,7 m ³ /sec
b. Fuite	0,74
c. Veinette 1160	2,085
d. Voie intermédiaire 10 P.	1,56
e. Pilier 10 P. couchant à 1060	5,968
f. Pilier 10 P. levant à 1060	4,740
g. Pilier Veinette à 1060	2,84
h. Bouveau N au nord du plantant	13,620
i. Fuite du plantant	2,37
j. Bouveau N au sud du plantant	15,99
k. Retour d'air - bouveau ouest	16,33
l. Fuite	2,10
m. Débit total du circuit 2	18,43
n. Fuite au by-pass de l'Aérex n° 2	1,5

Circuit 1.

q. Fuite du puits 2 à 1060	1,5 m ³ /sec
r. Entrée d'air générale à 1060	8,15
s. Taille en défoncement	1,48
t. Retour d'air 10 Paumes	3,73
u. Bouveau plantant de retour d'air	4,61
v. Plan dans 10 Paumes	1,50
w. Fuite venant de 1060	0,79
x. Bouveau N-E, nord de l'Aérex n° 1	2,29
p. Fuite du puits n° 2 à 950	1,376
y. Bouveau N-E, sud de l'Aérex n° 1	3,21
z. Fuite au by-pass de l'Aérex n° 1	1,583
Débit total du circuit	10,1 m ³ /sec

ETUDE DU CIRCUIT N° 3.

Ensemble des puits n° 1 et 3.

1. Puits n° 3.

Le relevé des températures dans le puits, représenté par la courbe (1) du diagramme 1 (fig. 6), montre que l'air se refroidit rapidement dans le puits jusqu'au niveau de 50 m environ et se réchauffe ensuite lentement.

Pour faire le calcul de la charge hydrostatique correspondant à la hauteur d'air du puits, nous considérerons séparément les trois tronçons suivants : du jour à 30 m, de 30 à 240 m et de 240 à 365 m; ces tronçons sont choisis de façon que les variations de température y soient très approximativement linéaires.

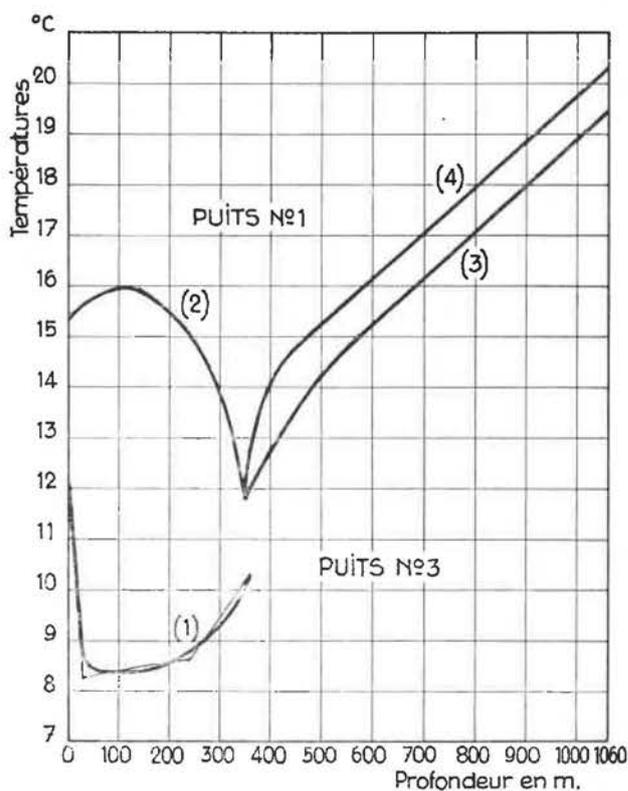


Fig. 6.

Hauteur totale du puits jusqu'au niveau inférieur envisagé : 365,3 m.

Mesures.

au jour — pression 740,4 mm Hg - température : 12°C - degré hygrométrique : $\varphi = 70\%$.
 au fond — pression 773,7 mm Hg - température : 10,3°C - degré hygrométrique : $\varphi = 90\%$.

Premier tronçon (0 à 30 m).

Vapeur d'eau à 12°C (saturation)

$$p_s = 142,9 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,01067 \text{ kg/m}^3$$

Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$142,9 \times 0,70 = 100,0 \text{ kg/m}^2.$$

La température varie de 12° à 8°3. Pour tenir compte de la variation de température, nous calculerons un poids spécifique fictif (cas 2), avec la température moyenne de 10,15°C.

On calcule facilement le poids spécifique de l'air dans ces conditions : 1,2099 kg/m³.

Nous calculerons la charge hydrostatique d'après la formule (2)

$$\log (p_0 + P_1) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,2099}{10,069,44} \cdot 30 \\ + \log (10,069,44)$$

On trouve que $p'_0 = p_0 + P_1 = 10,105,83 \text{ kg/m}^2$.

$$P_1 = 10,105,83 - 10,069,44 = 36,39 \text{ kg/m}^2.$$

Deuxième tronçon (de 30 à 240 m).

La température varie de 8,3° à 8,6° (moyenne : 8,45°). - Degré hygrométrique : $\varphi = 90\%$.

Vapeur d'eau à 8,45° (saturation)

$$p_s = 113,1 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,00853 \text{ kg/m}^3$$

Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$113,1 \times 0,9 = 101,79 \text{ kg/m}^2.$$

On calcule que le poids spécifique de l'air au niveau de 30 m est de 1,2216 kg/m³.

La charge hydrostatique est calculée d'après la formule (2), donc :

$$\log (p'_0 + P_2) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,2216}{10,105,83} \cdot 210 \\ + \log (10,105,83)$$

On trouve que $p''_0 = p'_0 + P_2 = 10,365,69 \text{ kg/m}^2$.

$$P_2 = 10,365,69 - 10,105,83 = 259,86 \text{ kg/m}^2.$$

Troisième tronçon (240 à 365 m).

La température varie de 8,6° à 10,2° (moyenne 9,4°C). Le degré hygrométrique moyen est de 86 %.

Vapeur d'eau à 9,4° :

$$p_s = 120,2 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,00905 \text{ kg/m}^3.$$

Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$120,2 \times 0,86 = 103,4 \text{ kg/m}^2.$$

Poids spécifique de l'air à $t = 9,4^\circ\text{C}$ et

$$p = 10,365,69 \text{ kg/m}^2 \text{ avec } p_v = 103,4 \text{ kg/m}^2$$

$$\delta = 1,249 \text{ kg/m}^3.$$

La charge hydrostatique, d'après la formule (2), se calcule comme suit :

$$\log (p''_0 + P_3) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,249}{10,365,69} \cdot 125,3 \\ + \log (10,365,69)$$

On trouve $p''_0 + P_3 = p_0 + P = 10,523,68 \text{ kg/m}^2$.

$$P_3 = 157,99 \text{ kg/m}^2.$$

Charge hydrostatique dans le puits :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 454,24 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge dans le puits :

$$h = p_0 + P - p_1 \\ = 10,523,68 - 10,522,32 = 1,36 \text{ kg/m}^2.$$

2. — Perte de charge dans la galerie de 356.

La galerie de communication entre le puits 3 et le puits 1 a une longueur totale de 520 m environ. Elle est en bon état.

Les cotes de ses extrémités sont :

— 235,13 m au puits n° 3,

— 239,48 m au puits n° 1.

Dénivellation : 4,35 m.

Mesures.

Envoyages du puits n° 3 :

pression 773,7 mm Hg - température 10,2°C

Envoyage du puits n° 1 :

pression 772,8 mm Hg - température 11,8°C

degré hygrométrique : 82 %.

Nous calculerons un poids spécifique d'air dans des conditions moyennes : température moyenne : 11°C — pression moyenne : 773,25 mm Hg, soit 10,516,2 kg/m².

Vapeur d'eau à 11°C (saturation) :

$$p_s = 133,8 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,01 \text{ kg/m}^3.$$

On calcule que le poids spécifique moyen de l'air est :

$$\delta = 1,2595 \text{ kg/m}^3.$$

Charge d'air correspondant à la dénivellation :

$$1,2595 \times 4,35 = 5,47 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge dans la galerie :

$$(773,7 - 772,8) \times 13,6 + 5,47 \\ = 12,24 + 5,47 = 17,71 \text{ kg/m}^2.$$

3. — Puits n° 1 (du jour à 356).

Le relevé des températures dans le puits n° 1, du jour à 356, est donné par la courbe (2) du diagramme 1 (fig. 6).

Pour les mesures, le thermomètre a été placé vers le milieu du puits.

Ces températures ne peuvent pas être utilisées pour effectuer un calcul exact de perte de charge. En effet, dans une même section, la température varie suivant la position du point de station par rapport aux conduites d'air comprimé. L'écart extrême peut atteindre 1,5 à 2°.

On constate d'ailleurs, lorsque l'on calcule la perte de charge d'après les mesures de température, que l'on arrive à des chiffres incohérents.

La mesure de la perte de charge dans ce tronçon de puits a été faite à l'aide d'un tube en U, placé à 356, à l'extrémité d'une tuyauterie à air comprimé ouverte à l'orifice du puits. La différence de pression n'atteint pas 1 mm d'eau.

La perte de charge dans le tronçon de puits envisagé doit être très faible, le débit d'air n'étant que de 5,46 m³/sec. Nous la négligerons et nous utiliserons, comme valeur de la charge hydrostatique correspondant à la hauteur du tronçon, la différence de pression mesurée au baromètre.

Pression à 356 :

$$772,8 \text{ mm Hg, soit } 10.510,08 \text{ kg/m}^2.$$

A l'orifice du puits :

$$741,6 \text{ mm Hg, soit } 10.085,76 \text{ kg/m}^2.$$

4. — Aération naturelle entre les puits n° 3 et n° 1.

La force aéromotrice de l'aération naturelle est donnée par :

$$A_n = P_3 - P_1 - \delta (z_3 - z_1)$$

où P_3 et P_1 sont les charges hydrostatiques, z_3 et z_1 les cotes des recettes des puits n° 3 et n° 1.

$$z_3 = + 130,18 \text{ m} \\ z_1 = + 119,38 \text{ m} \\ z_3 - z_1 = 10,80 \text{ m}$$

Poids spécifique de l'air au jour, compte tenu de l'humidité :

$$\delta = 1,204 \text{ kg/m}^3.$$

Charge correspondant à la différence d'altitude des recettes :

$$1,204 \times 10,8 = 13 \text{ kg/m}^2.$$

Les charges hydrostatiques entrant en jeu dans le calcul de l'aération naturelle sont donc :

$$P_3 = 454,24 + 5,47 = 459,73 \text{ kg/m}^2$$

$$P_1 = 424,32 \text{ kg/m}^2$$

$$\delta (z_3 - z_1) = 13 \text{ kg/m}^2.$$

$$\text{Donc : } A_n = 459,73 - 437,32 = 22,41 \text{ kg/m}^2.$$

Remarques.

1) On constate que, si l'on retranche la quantité $\delta (z_3 - z_1)$ de la pression barométrique à la recette du puits n° 1, on doit trouver la pression barométrique à la recette du n° 3. Or, on a :

$$10.085,76 - 13 = 10.072,76 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{au lieu de } 10.069,44 \text{ kg/m}^2,$$

soit une différence de 0,25 mm Hg.

Cette erreur de fermeture est due, soit à l'erreur du baromètre, soit à une variation effective de la pression barométrique au cours des mesures.

Etant donné l'exécution des mesures, une variation de la pression barométrique ne doit pas affecter les mesures de pression dans la galerie de communication ou dans le puits n° 1. Elle affecte, au contraire, les mesures dans le puits n° 3, s'il s'agissait donc d'une variation de pression barométrique, la perte de charge du puits n° 3 serait entachée d'une erreur de 3,32 kg/m² par défaut.

La perte de charge réelle serait alors de 4,7 kg/m².

2) La somme des pertes de charge calculées, dans le circuit n° 3, est :

$$17,71 + 1,36 = 19,07 \text{ kg/m}^2.$$

* * *

LE PUITTS N° 2.

Le diagramme 2 (fig. 7) donne deux relevés de température le long du puits n° 2.

La courbe (1) se rapporte au 29 mars 1956, la courbe (2) au 23 avril 1956. Le diagramme montre que l'air se refroidit rapidement dans le puits jusqu'à une température minimum qui est atteinte vers 200 m. A partir du niveau de 300 m, l'air s'échauffe régulièrement d'environ 1 degré par 100 m.

Comme nous l'avons dit précédemment, le puits n° 2 est en surpression par rapport au puits n° 1. Il en résulte des fuites vers ce dernier. Seules les fuites suivantes sont retenues :

à 356 m,	1,46 m ³ /sec
841 m,	1 m ³ /sec
950 m,	1,376 m ³ /sec
1.060 m,	1,5 m ³ /sec

Le débit d'air dans le puits à 1160 m est de 15,7 m³/sec. (Il a été vérifié évidemment que le débit était le même dans les deux situations étudiées ci-après).

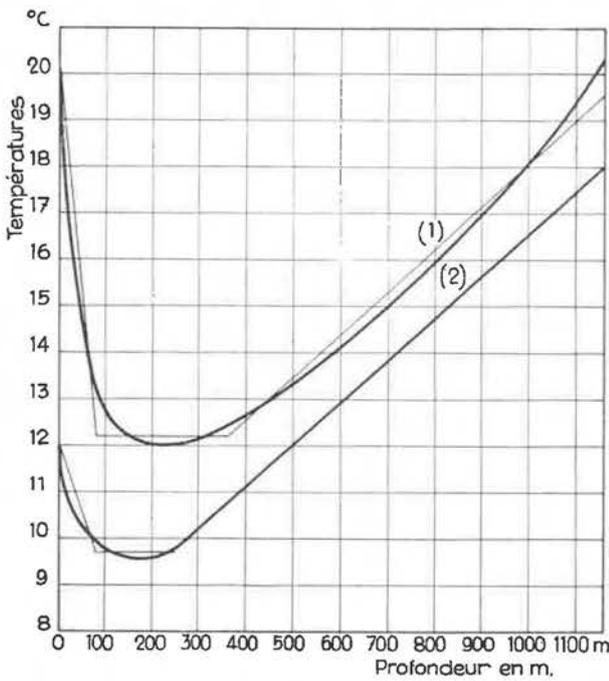


Fig. 7.

1. Mesures du 29 mars.

Pression au jour (recette) : 746,7 mm Hg, soit 10.155,12 kg/m² - degré hygrométrique : 65 %.

Pression à 1160 m :

853,5 mm Hg, soit 11.607,60 kg/m².

La courbe des températures montre qu'il faut subdiviser le puits en trois tronçons.

Premier tronçon (du jour à 80 m).

Vapeur d'eau à 20°C :

$$p_s = 191,4 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,014 \text{ kg/m}^3.$$

Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$191,4 \times 0,65 = 124,4 \text{ kg/m}^2.$$

On trouve que le poids spécifique de l'air au jour est :

$$\delta = 1,1783 \text{ kg/m}^3.$$

Nous calculerons la charge hydrostatique dans ce tronçon par la formule (4) :

$$P = \delta_0 R' T_0 \left[\left(\frac{T_0}{T_f} \right)^{\frac{1}{k' R'}} - 1 \right]$$

où $T_0 = 293$
 $T_f = 285,2$

$$\frac{1}{k' R'} = \frac{80}{7,8 \times 29,491} = 0,34779$$

On trouve $P = 96,215 \text{ kg/m}^2$.

La pression calculée, au niveau de 80 m, est donc

$$10.155,2 + 96,21 = 10.251,33 \text{ kg/m}^2.$$

Deuxième tronçon (de 80 m à 356 m).

Nous pouvons considérer que la température est constante et égale à la moyenne : 12,2°C.

Degré hygrométrique de l'air : 95 %.

Hauteur réelle du tronçon : 279 m.

Vapeur d'eau à 12,2°C :

$$p_s = 144,8 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,0108 \text{ kg/m}^3.$$

Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$144,8 \times 0,95 = 137,6 \text{ kg/m}^2.$$

Le poids spécifique de l'air au niveau de 80 m est

$$\delta = 1,22158 \text{ kg/m}^3.$$

La charge hydrostatique se calcule par la formule (1) :

$$\log(p'_0 + P_2) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,22158}{10.251,33} \cdot 279 + \log(10.251,33)$$

On trouve que $p'_0 + P_2 = 10.598,07 \text{ kg/m}^2$.

Donc :

$$P_2 = 10.598,07 - 10.251,33 = 346,74 \text{ kg/m}^2.$$

Troisième tronçon (de 356 à 1160 m).

Hauteur du tronçon : 798 m.

A 356 m, température utilisée pour les calculs : 12,2°C - degré hygrométrique de l'air : 95 %.

A 1160 m, température : 20,3°C - degré hygrométrique de l'air : 55 %.

On calcule facilement que le poids spécifique de l'air, à 356 m, est $\delta = 1,26288 \text{ kg/m}^3$.

La charge hydrostatique totale du tronçon sera calculée par la formule (4), en supposant que la température varie linéairement de 12,2° à 19,5°C.

(Nous prenons cette température finale au lieu de 20,3°C, parce que nous adoptons non pas la courbe réelle des températures, mais la droite moyenne).

Tous calculs faits, on trouve que :

$$P_3 = 1.043,596 \text{ kg/m}^2.$$

Charge hydrostatique totale :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 1.486,55 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge dans le puits :

$$\begin{aligned} h &= p_0 + P + p_1 \\ &= 10.155,12 + 1.486,55 - 11.607,60 \\ &= 34,07 \text{ kg/m}^2. \end{aligned}$$

2. Mesures du 25 avril.

Le relevé des températures dans le puits est donné par la courbe (2) du diagramme. Nous appuyant sur

cette courbe, nous diviserons le puits en trois tronçons : de 0 à 80 m, de 80 m à 240 m, de 240 m à 1160 m.

Pression au jour (recette) : 740,5 m m Hg, soit 10.070,80 kg/m² - degré hygrométrique : 67 %.

Pression à 1160 m :

$$847,1 \text{ mm Hg, soit } 11.520,56 \text{ kg/m}^2.$$

Premier tronçon (du jour à 80 m).

Nous supposons que la température varie linéairement de 12° à 9,7°C.

Vapeur d'eau à 12°C :

$$p_s = 143 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,0107 \text{ kg/m}^3.$$

Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$143 \times 0,67 = 95,81 \text{ kg/m}^2.$$

Poids spécifique de l'air au jour : 1,20195 kg/m³.

Nous calculons la charge hydrostatique par la formule (4) qui donne :

$$P_1 = 1,20195 \times 29,491 \times 285 \left[\left(\frac{285}{282,7} \right)^{1,17943} - 1 \right]$$

$$P_1 = 96,98 \text{ kg/m}^2.$$

Pression calculée au niveau de 80 m :

$$10.070,80 + 96,98 = 10.167,78 \text{ kg/m}^2.$$

Deuxième tronçon (de 80 à 240 m).

La température est constante : 9,7°C.

Le degré hygrométrique = 80 %.

Propriétés de la vapeur d'eau à 9,7°C :

$$p_s = 122,7 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,00922 \text{ kg/m}^3.$$

Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air :

$$p_v = 122,7 \times 0,8 = 98,16 \text{ kg/m}^2.$$

Poids spécifique de l'air au niveau de 80 m :

$$\delta = 1,2239 \text{ kg/m}^3.$$

La charge hydrostatique se calcule par la formule (1) :

$$\log (p'_0 + P_2) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,2239}{10.167,78} \cdot 160$$

$$+ \log (10.167,78)$$

$$p'_0 + P_2 = 10.365,38 \text{ kg/m}^2.$$

$$P_2 = 10.365,38 - 10.167,78 = 197,60 \text{ kg/m}^2.$$

Troisième tronçon (de 240 à 1160 m).

Hauteur vraie du tronçon : 917 m.

On admet que la température varie linéairement de 9,7° à 18°C.

Poids spécifique de l'air au niveau de 240 m :

$$\delta = 1,2478 \text{ kg/m}^3.$$

On calcule la charge hydrostatique par la formule (4) qui donne :

$$P_3 = 1,2478 \times 29,491 \times 282,7 \left[\left(\frac{291}{282,7} \right)^{3,7463} - 1 \right]$$

$$P_3 = 1.190,54 \text{ kg/m}^2.$$

Charge hydrostatique totale :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 1.485,12 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge dans le puits :

$$\begin{aligned} h &= p_0 + P - p_1 \\ &= 10.070,80 + 1.485,12 - 11.520,56 \\ &= 35,36 \text{ kg/m}^2. \end{aligned}$$

Conclusion.

Nous obtenons donc, pour des conditions assez différentes, deux valeurs de la perte de charge avec une concordance très satisfaisante : 34,07 kg/m² et 35,36 kg/m².

Dans les calculs ultérieurs, nous utiliserons la moyenne : 34,7 kg/m².

Calcul du coefficient de perte de charge.

	du jour à 870 m	de 870 à 1160 m
Section moyenne	8,654 m ²	13,739 m ²
Périmètre moyen	11,23 m	13,06 m

Nous avons vu que les fuites du puits n° 2 vers le puits n° 1 se trouvent aux niveaux de 356, 841, 950 et 1060 m.

Les données sont concentrées dans le tableau V.

Tableau V

Désignation	Hauteur	Section	Périmètre	Débit
0 à 356	354 m	8,65 m ²	11,23 m	20,79 m ³ /sec
356 à 841	480	8,65	11,23	19,33
841 à 950	105	13,74	13,06	18,58
950 à 1060	112,5	13,74	13,06	17,2
1060 à 1160	101	13,74	13,06	15,7

Le coefficient de perte de charge k répond à la formule :

$$h = k \cdot (P/S^3) \cdot L \cdot Q^2$$

En effectuant les calculs d'après les données du tableau, on obtient :

$$34,7 = k (2655 + 3112 + 182,3 + 167,55 + 125,35)$$

D'où : $k = 34,7/6242,2$

$$k = 0,00556.$$

PUITS DE RETOUR D'AIR

Le relevé des températures dans le puits est donné par le diagramme 3 (fig. 8).

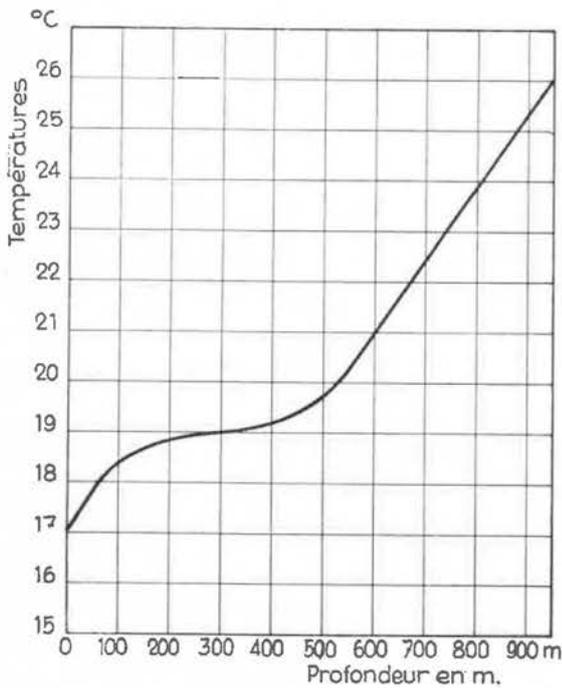


Fig. 8.

Les mesures de pression effectuées sont (en mm Hg) :

au jour :	743,5	743,8
au fond :	835,5	835,8

Nous ferons les calculs à l'aide du second groupe de mesures. D'autre part, nous diviserons le puits en deux tronçons, de 0 à 500 m et de 500 m à 965 m, les variations de température étant supposées linéaires dans chaque tronçon.

L'air est saturé dans tout le puits.

Premier tronçon (de 0 à 500 m).

A l'orifice du puits, la pression est de 743,8 mm Hg, soit 10.115,68 kg/m², la température est de 17°C.

Propriétés de la vapeur d'eau à 17°C :

$$p_s = 197,5 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,0145 \text{ kg/m}^3.$$

Poids spécifique de l'air à l'orifice du puits :

$$1,1985 \text{ kg/m}^3.$$

La charge hydrostatique sera calculée par la formule (4) :

$$P_1 = 1,1985 \times 29,491 \times 290 \left[\left(\frac{293}{290} \right)^{5,6514} - 1 \right]$$

$$P_1 = 613,986 \text{ kg/m}^2.$$

Deuxième tronçon (de 500 à 965 m).

Température à 500 m : 20°C.

Pression calculée : 10.729,666 kg/m².

Propriétés de la vapeur d'eau à 20°C :

$$p_s = 238,3 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,0173 \text{ kg/m}^3.$$

Poids spécifique de l'air au niveau de 500 m :

$$\delta = 1,24014 \text{ kg/m}^3.$$

Charge hydrostatique :

$$P_2 = 1,24014 \times 29,491 \times 293 \left[\left(\frac{299}{293} \right)^{2,628} - 1 \right]$$

$$P_2 = 586,16 \text{ kg/m}^2.$$

Charge hydrostatique totale :

$$P = P_1 + P_2 = 1.200,15 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge :

$$\begin{aligned} h &= p_1 - (p_0 + P) \\ &= 11.366,88 - (10.115,68 + 1.200,15) \\ &= 51 \text{ kg/m}^2. \end{aligned}$$

Calcul du coefficient de perte de charge.

Section moyenne : 8,01 m².

Périmètre moyen : 10,645 m.

(P/S₃) moyen : 0,02158.

Hauteur totale : 965 m.

Débit : 28,6 m³/sec.

Perte de charge : 51 kg/m².

On a : $k = 51/17.034$

$$k = 0,002994.$$

PUITS N° 1.

Nous avons étudié, dans ce qui précède, la partie supérieure du puits, de 356 au jour, parcourue par un courant d'air ascendant.

Nous avons vu à cette occasion que le relevé des températures était entaché d'incertitude et que, de ce fait, les calculs ne pouvaient donner aucun résultat exact. La même incertitude grève les mesures faites dans le puits sous le niveau de 356 m.

Le diagramme 1 (fig. 6) donne les relevés de températures. Les courbes (1), (2) et (3) ont été relevées le même jour; la courbe (4), à un moment différent.

Le tableau suivant donne un aperçu sur les principales mesures.

Référence : au jour $p = 754,9$ mm Hg, $t_s = 10^\circ\text{C}$.

La pression en (10) étant $11.621,20$ kg/m², on calcule le poids spécifique de l'air à cette pression et à la température moyenne de $24,35^\circ\text{C}$, avec $\varphi = 43,7\%$.

Station	Pression		Températures (psychromètre)	
	en mm Hg	en kg/m ²	t_s	t_h
4	843,3	11.468,88		
7	845,6	11.500,16	28,9°C	22,1°C
9	845,6	11.500,16	29,1	21,5
10	854,5	11.621,20	25,9	18,2
11	862,3	11.727,28	22,8	15,4
12	863	11.736,8	18,6	12,8

1. Perte de charge dans les boueaux d'entrée d'air au niveau de 1160 m (de 12 à 11).

Cote de l'envoyage (12) — 1037 m
 Cote du robinage principal (11) — 1034 m
 Poids spécifique de l'air réel :

en (11) $\delta = 1,348$ kg/m³
 en (12) $\delta = 1,370$ kg/m³

Poids spécifique moyen : $\delta = 1,359$ kg/m³.

Charge correspondant à la dénivellation :

$$1,359 \times 3 = 4,08 \text{ kg/m}^2.$$

La pression mesurée en (11) est de $11.727,28$ kg/m².
 La perte de charge calculée est donc :

$$11.736,8 - (11.727,28 + 4,08) = 5,44 \text{ kg/m}^2.$$

2. Perte de charge dans les chantiers.

Nous considérerons les chantiers globalement entre leurs bornes communes (7) et (11). Nous pouvons donc nous contenter d'étudier les pertes de charge dans l'un d'eux seulement. Nous choisissons le circuit 10 P. Levant parce que plus accessible et plus régulier. Nous divisons ce circuit en deux tronçons.

a) De (10) à (11).

(Tête du freineur à mi-tranche - Robinage principal). Différence de cote de (10) à (11) : 62 m.

La dénivellation n'étant pas considérable, nous nous contenterons d'utiliser des températures moyennes.

Température moyenne : $24,35^\circ\text{C}$.

Degrés hygrométriques :

en (10), $\varphi = 44,8\%$; en (11), $\varphi = 42,6\%$
 moyenne : $43,7\%$.

Propriétés de la vapeur d'eau à $24,4^\circ\text{C}$:

$$p_s = 310 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,0222 \text{ kg/m}^3.$$

Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$135,47 \text{ kg/m}^2,$$

On trouve : $\delta'_0 = 1,3289$ kg/m³.

Charge hydrostatique (d'après formule 2 de l'introduction) :

$$\log(p_0 + P) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,3289}{11.621,20} \cdot 62 + \log(11.621,20)$$

$$p_0 + P = 11.701,17 \text{ kg/m}^2.$$

$$P = 79,97 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge :

$$11.727,28 - 11.701,17 = 26,11 \text{ kg/m}^2.$$

b) Chantier 10 P Levant (de 10 à 7).

Température moyenne de l'air : $27,4^\circ\text{C}$.

Degrés hygrométriques :

dans la voie (10) : $44,8\%$; au pilier (7) : $58,4\%$

moyenne : $\varphi = 51,6\%$.

L'aérage du chantier est réglé par une porte au niveau de 1060. En aval de la porte, la pression est de $11.500,16$ kg/m²; elle est de $11.546,4$ kg/m² en amont.

Propriétés de la vapeur d'eau à $27,4^\circ\text{C}$:

$$p_s = 372,2 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,0265 \text{ kg/m}^3.$$

Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$374,4 \times 0,516 = 193,19 \text{ kg/m}^2.$$

Poids spécifique de l'air à $p = 11.546,4$ kg/m² et $t = 27,4^\circ\text{C}$:

$$\delta = 1,30585 \text{ kg/m}^3.$$

Charge hydrostatique correspondant à la relevée de ce circuit (soit 38 m) :

$$\log(p_0 + P) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,30585}{11.546,4} \cdot 38 + \log(11.546,4)$$

$$p_0 + P = 11.596,18 \text{ kg/m}^2$$

$$P = 11.596,18 - 11.546,4 = 49,78 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge totale :

$$11.621,2 - (11.500,16 + 49,78) = 71,26 \text{ kg/m}^2.$$

3. Perte de charge dans les bouveaux de 1060 m. (de 7 à 4).

La différence de pression entre ces deux points, mesurée au baromètre anéroïde, est de 2,3 mm Hg, soit 31,3 kg/m².

On doit y ajouter une correction tenant compte de la dénivellation de 1 m.

La perte de charge est donc :

$$31,3 + 1,3 = 32,6 \text{ kg/m}^2.$$

4. Retour d'air général (de 4 à 1).

Le retour d'air général a fait l'objet de mesures séparées (sous une pression barométrique au jour de 751,6 mm Hg = 10.221,76 kg/m²).

a) De 1060 à l'aérex n° 2 ((4) à (3)).

Pression à 1060 : 11.425,36 kg/m².

Pression en amont de l'aérex : 11.149,28 kg/m².

Température : 27,5°C.

Degré hygrométrique moyen : 47,6 %.

Différence de cote des extrémités : 114,15 m.

Propriétés de la vapeur d'eau à 27,5°C :

$$p_s = 374,4 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,0265 \text{ kg/m}^3.$$

Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$385,3 \times 0,476 = 183,4 \text{ kg/m}^2.$$

Poids spécifique de l'air au niveau de 965 m :

$$\delta = 1,2594 \text{ kg/m}^3.$$

La charge hydrostatique se calcule simplement par :

$$\log(p_0 + P) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,2594}{11.149,28} \cdot 114,15$$

$$+ \log(11.149,28)$$

$$p_0 + P = 11.294,34 \text{ kg/m}^2$$

$$P = 145,06 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge : 131,02 kg/m².

b) De l'aérex au puits (2 à 1).

Cette perte de charge a été mesurée au baromètre. La moyenne de trois mesures est : 2,9 mm Hg, soit 39,44 kg/m².

Perte de charge totale dans le circuit 2.

Puits n° 2	34,7 kg/m ²
Bouveau à 1160 (de 12 à 11)	5,44
Chantiers	97,37
Bouveaux à 1060 (de 7 à 4)	32,6
	<hr/>
	170,11 kg/m ²

Retour général : 131,02 + 39,44 = 170,46

Perte de charge totale : 340,57 kg/m²

Dépression du ventilateur : 353 kg/m².

Aéragé naturel.

Le calcul de l'aéragé naturel pose un problème délicat. Il est en effet impossible de faire des mesures de pression et de température dans tout le circuit en un jour. Le puits d'entrée d'air et le puits de retour d'air doivent d'ailleurs être étudiés chacun séparément.

Il faut réunir le résultat de mesures effectuées à des intervalles de quelques jours. Il faut choisir parmi toutes les mesures celles pour lesquelles les conditions atmosphériques sont semblables (température principalement). La température initiale pouvant être considérée comme la même dans les mesures choisies, il suffit de remarquer que, toutes autres conditions égales, la charge hydrostatique dans un puits est proportionnelle à la pression à l'orifice.

Les groupes de mesures choisis sont les suivants :

mesures dans le puits de retour d'air :

au jour = 744 mm Hg.

(Pression à la recette du puits de retour d'air - Les autres pressions sont mesurées à la recette du puits d'entrée).

mesures dans le puits d'entrée d'air :

(23-4-56) 740,5 mm Hg.

mesures dans les travaux :

(20-4-56) 754,9 mm Hg.

mesures dans le retour d'air général :

(19-4-56) 751,6 mm Hg.

Température au jour : 10°C (le 23-4, 12°C).

Nous calculerons l'aéragé naturel pour le 20-4-56.

a) Charge hydrostatique du puits de retour d'air.

$$1.201,70 (753/744) = 1.216 \text{ kg/m}^2.$$

b) Charge hydrostatique du puits n° 2.

Au lieu d'utiliser un coefficient de transformation, nous calculerons directement la charge, chose aisée puisque nous connaissons la perte de charge.

Pression mesurée au jour : 754,9 mm Hg.

Pression mesurée à 1160 : 863 mm Hg.

d'où

$$P = (863 - 754,9) 13,6 + 34,7 = 1.504,86 \text{ kg/m}^2$$

c) Charge hydrostatique du retour d'air général.

$$145,06 (754,9/751,6) = 145,70 \text{ kg/m}^2.$$

d) Charge hydrostatique dans les travaux.

Bouveau à 1160 (de 12 à 11)	4,08 kg/m ²
Chantiers (de 11 à 7)	129,75 kg/m ²
Bouveau à 1060 (de 7 à 4)	-2,6 kg/m ²

Nous avons vu précédemment que la perte de charge dans le puits de retour d'air était de 51 kg/m². La force aéromotrice disponible pour le circuit 2 est donc de 343,1 kg/m².

Il y a donc concordance à moins de 1 % près.

CIRCUIT N° 1 (ETAGE DE 1060 M)

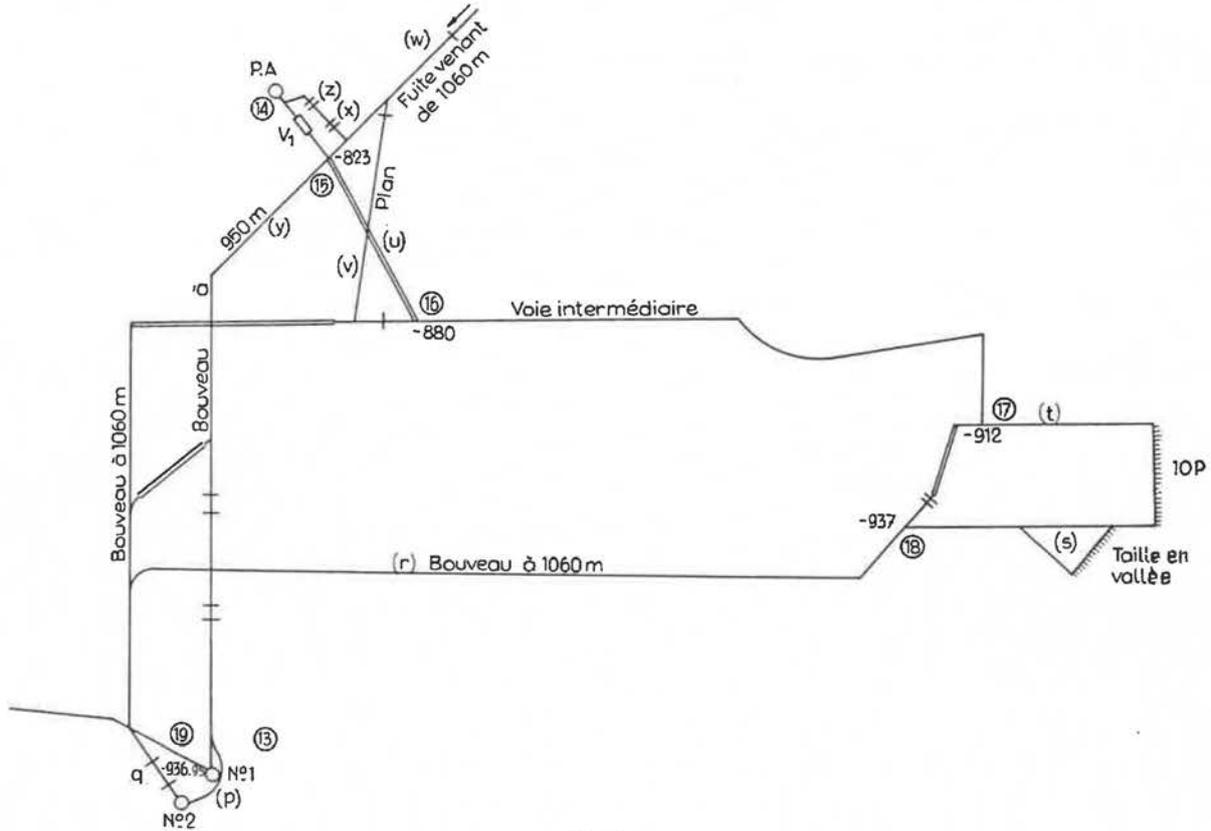


Fig. 10.

e) Correction d'altitude.

Cote recette puits de retour d'air	+ 143,15 m
Cote recette puits n° 2	+ 119,38 m

23,77 m

Poids spécifique de l'air au jour : 1,236 kg/m³.
Charge : 1,236 × 23,77 = 29,38 kg/m².

Charges d'air, côté entrée :
1.504,86 + 29,38 = 1.534,24 kg/m².

Charges d'air, côté retour :	
Puits de retour	1.216,24 kg/m ²
Retour général	145,70
Travaux	131,23
	<hr/>
	1.493,17 kg/m ²

Force aéromotrice de l'aérage naturel :
1.534,24 - 1.493,17 = 41,07 kg/m².

Conclusion.

La force aéromotrice totale calculée est de :
353 + 41,1 = 394,1 kg/m².

La somme des pertes de charge dans le circuit 2 est de 340,57 kg/m².

1. Bouveau plantant de retour d'air (15 à 16).

Pression en tête (15) : 11.123,44 kg/m²

Pression au pied (16) : 11.285,28 kg/m²

Température moyenne : 27°C.

Degré hygrométrique : 80 %.

Propriétés de la vapeur d'eau à 27°C :

$$p_s = 363,4 \text{ kg/m}^2 \quad \delta_s = 0,0257 \text{ kg/m}^3.$$

Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air :

$$290,7 \text{ kg/m}^2.$$

Poids spécifique de l'air en tête du plantant :

$$1,2587 \text{ kg/m}^3.$$

Différence de cote : 57 m.

Charge hydrostatique :

$$\log(p_0 + P) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,2587}{11.123,44} \cdot 57 + \log(11.123,44)$$

$$p_0 + P = 11.195,52 \text{ kg/m}^2$$

$$P = 72,08 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge : 89,76 kg/m².

Cette perte de charge a été mesurée également à l'aide d'un tube en U branché au pied du plantant sur une ancienne tuyauterie ouverte à environ 10 m en amont de l'extrémité supérieure du plantant. La différence de pression mesurée est de 88 mm d'eau.

2. Voies de retour d'air (de 16 à 17).

Pied du plantant (16) : $p = 11.285,28 \text{ kg/m}^2$.

En (17) : $p = 11.342,4 \text{ kg/m}^2$.

Température : 27°C.

Humidité : 80 %.

Différence de cote : 33 m.

Poids spécifique de l'air au pied du plantant : 1,2729 kg/m³.

Charge hydrostatique :

$$\log(p_0 + P) = \frac{1}{2,3026} \cdot \frac{1,2729}{11,123,44} \cdot 33$$

$$+ \log(11.285,28)$$

$$p_0 + P = 11.327,44 \text{ kg/m}^2$$

$$P = 42,16 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge : 15 kg/m².

3. Chantier (de 17 à 18).

Pression en (17) : 11.342,4 kg/m² - t = 27 °C

Pression en (18) : 11.381,84 kg/m² - t = 24,5°C

Degré hygrométrique en (17) : 80 %.

en (18) : 45 %.

Différence de cote : 23 m.

Poids spécifique de l'air au pilier (17) :

$$\delta = 1,2787 \text{ kg/m}^3$$

Poids spécifique de l'air à l'entrée (18) :

$$\delta = 1,3004 \text{ kg/m}^3.$$

Poids spécifique moyen : 1,2896 kg/m³.

Charge hydrostatique :

$$1,2896 \times 23 = 29,66 \text{ kg/m}^2.$$

Perte de charge : 9,78 kg/m².

4. Perte de charge dans le bouveau Est à 1060 m (18 à 19).

Très faible; 0,2 mm Hg. soit 2,7 kg/m².

5. Perte de charge totale dans le circuit 1.

Puits n° 1	4 kg/m ²
Bouveaux à 1060	2,7
Chantier (17 à 18)	9,78
Voies de retour (16 à 17)	15
Plantant (15 à 16)	89,76
Perte de charge totale	121,24 kg/m ²

6. Dépression du ventilateur : 144 kg/m².

7. Aérage naturel.

Nous retrouvons la même difficulté que celle signalée dans l'étude du circuit 2, c'est-à-dire la nécessité de faire les mesures en plusieurs jours et de réunir toutes ces mesures ensuite.

D'autre part, le calcul de l'aérage naturel doit se faire pour le circuit suivant : puits n° 3, communication à 356, puits n° 1 de 356 à 1060, travaux, puits de retour d'air. Il y a donc trois charges hydrostatiques à recalculer pour une pression unique à la surface. De plus, si l'on remarque que les valeurs de charges hydrostatiques et de perte de charge sont entachées d'une légère erreur, on est certain de retrouver cette erreur dans le bilan du circuit 1.

On peut calculer avec plus de précision le circuit plus simple constitué par le puits n° 1, de la surface à 1060 m, les travaux et le puits de retour d'air; enfin, seule la charge hydrostatique du puits de retour d'air doit être recalculée, celle du puits n° 1 pouvant être mesurée directement au baromètre.

Le bilan de ce circuit doit donner aussi l'égalité de la force aéromotrice et de la somme de pertes de charge.

a) Charge hydrostatique dans le puits n° 1.

Pression mesurée à la recette :

$$739 \text{ mm Hg, soit } 10.050,40 \text{ kg/m}^2$$

Pression mesurée à 950 :

$$826 \text{ mm Hg, soit } 11.233,6 \text{ kg/m}^2.$$

Par suite d'un incident, la pression n'a pas été mesurée au niveau de 1060 m.

On calcule facilement cette pression, le poids spécifique de l'air étant de 1,3058 kg/m³ à 950 m.

On trouve que la pression doit être de :

$$11.381,57 \text{ kg/m}^2.$$

La perte de charge dans le puits étant de 4 kg/m², la charge hydrostatique est :

$$P = (11.381,57 - 10.050,40) + 4 = 1.335,17 \text{ kg/m}^2$$

b) Charge hydrostatique dans le puits de retour d'air.

$$1.201,70 \times (737/744) = 1.190,39 \text{ kg/m}^2.$$

c) Correction d'altitude.

Poids spécifique de l'air au jour : 1,2115 kg/m³.

$$C = 1,2115 \times 23,77 = 28,80 \text{ kg/m}^2.$$

d) Charge hydrostatique de travaux.

Plantant	72,08 kg/m ²
Voies à mi-tranche	42,16
Chantier	29,66
	<hr/>
	143,90 kg/m ²

e) Force aéromotrice de l'aéragé naturel.

Puits d'entrée (n° 1)	1.335,17 kg/m ²
Correction d'altitude	28,80
Travaux	143,90
Puits de retour d'air	1.190,39

$$A_n = 1.363,97 - 1.334,29 = 29,68 \text{ kg/m}^2.$$

f) Force aéromotrice totale :

$$144 + 29,68 = 173,68 \text{ kg/m}^2.$$

g) Force aéromotrice disponible.

La perte de charge dans le puits de retour d'air étant de 51 kg/m², la force aéromotrice disponible pour le circuit 1 est : 173,68 - 51 = 122,68 kg/m².

Il y a donc concordance entre la somme des pertes de charge et la force aéromotrice à 1 % d'erreur près.

Calcul de l'aéragé naturel vrai.

Charge hydrostatique du puits n° 3 :

$$454,24 \times (738/740,4) = 452,77 \text{ kg/m}^2.$$

Charge dans la galerie de communication à 356 :

$$5,47 \text{ kg/m}^2.$$

Correction d'altitude :

$$1,2115 \times 13 = 15,75 \text{ kg/m}^2.$$

Charge hydrostatique au puits n° 1 de 356 m à 1060 m.

De 0 à 356 :

$$424,32 \times (739/741,6) = 422,83 \text{ kg/m}^2.$$

De 356 à 1060 :

$$1.335,17 - 422,83 = 912,34 \text{ kg/m}^2.$$

Charges hydrostatiques.

Puits n° 3	452,77 kg/m ²
Galerie à 356	5,47
Puits n° 1	912,34
Correction d'altitude	15,75
Travaux	143,90
Puits de retour d'air	1.190,39

$$A_n = 1.386,97 - 1.334,29 = 52,04 \text{ kg/m}^2.$$

Somme des pertes de charge du circuit.

Puits n° 3	1,36 kg/m ²
Galerie à 356	17,71
Puits n° 1	4
Travaux et retours d'air	117,24
Perte de charge totale	140,31 kg/m ²

La force aéromotrice totale est donc :

$$144 + 52,04 = 196,04 \text{ kg/m}^2.$$

Force aéromotrice disponible.

La perte de charge du puits de retour d'air étant de 51 kg/m², il reste : 145,04 kg/m².

La concordance est, comme prévu, moins bonne que dans les calculs précédents.

Fonctionnement des ventilateurs.

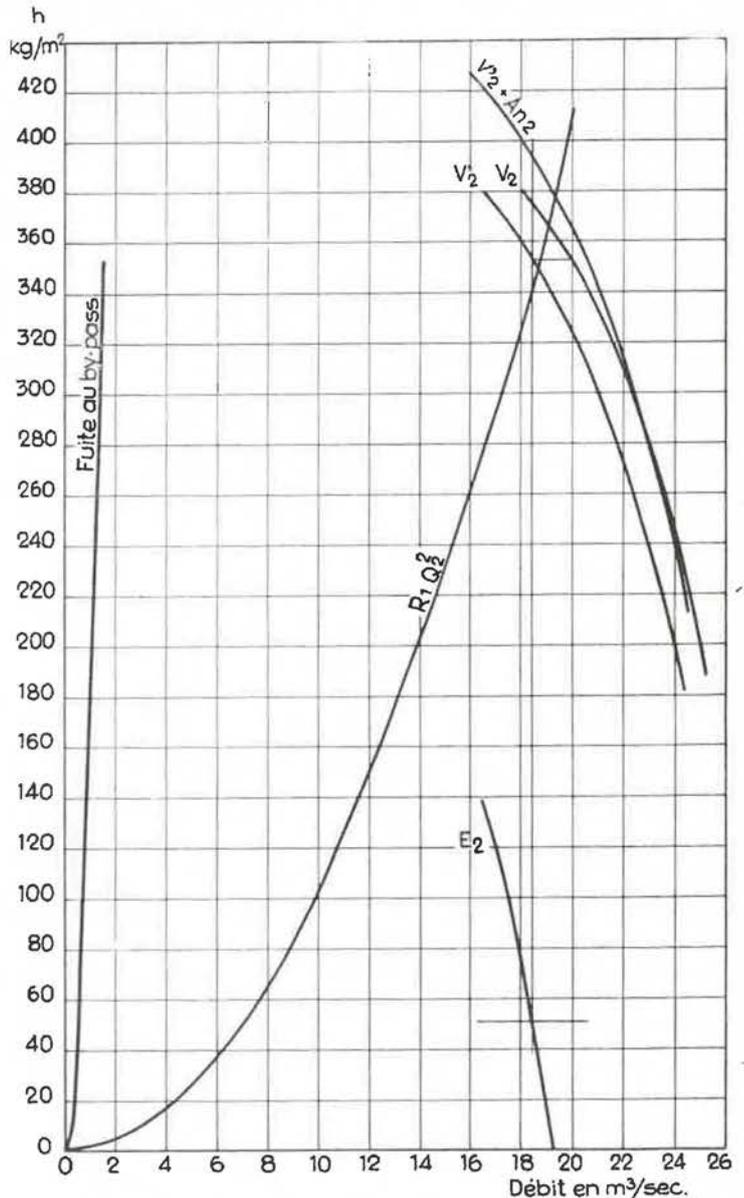
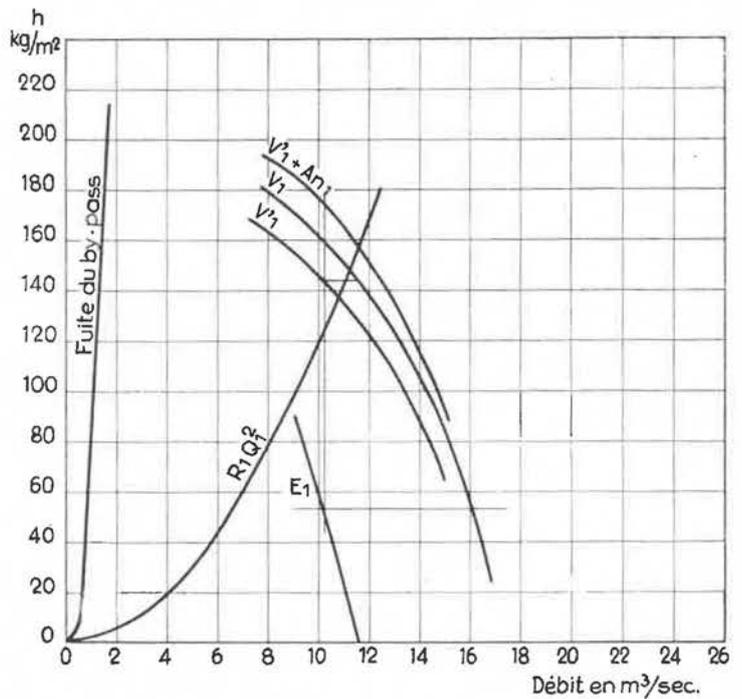


Fig. 11 et 12.

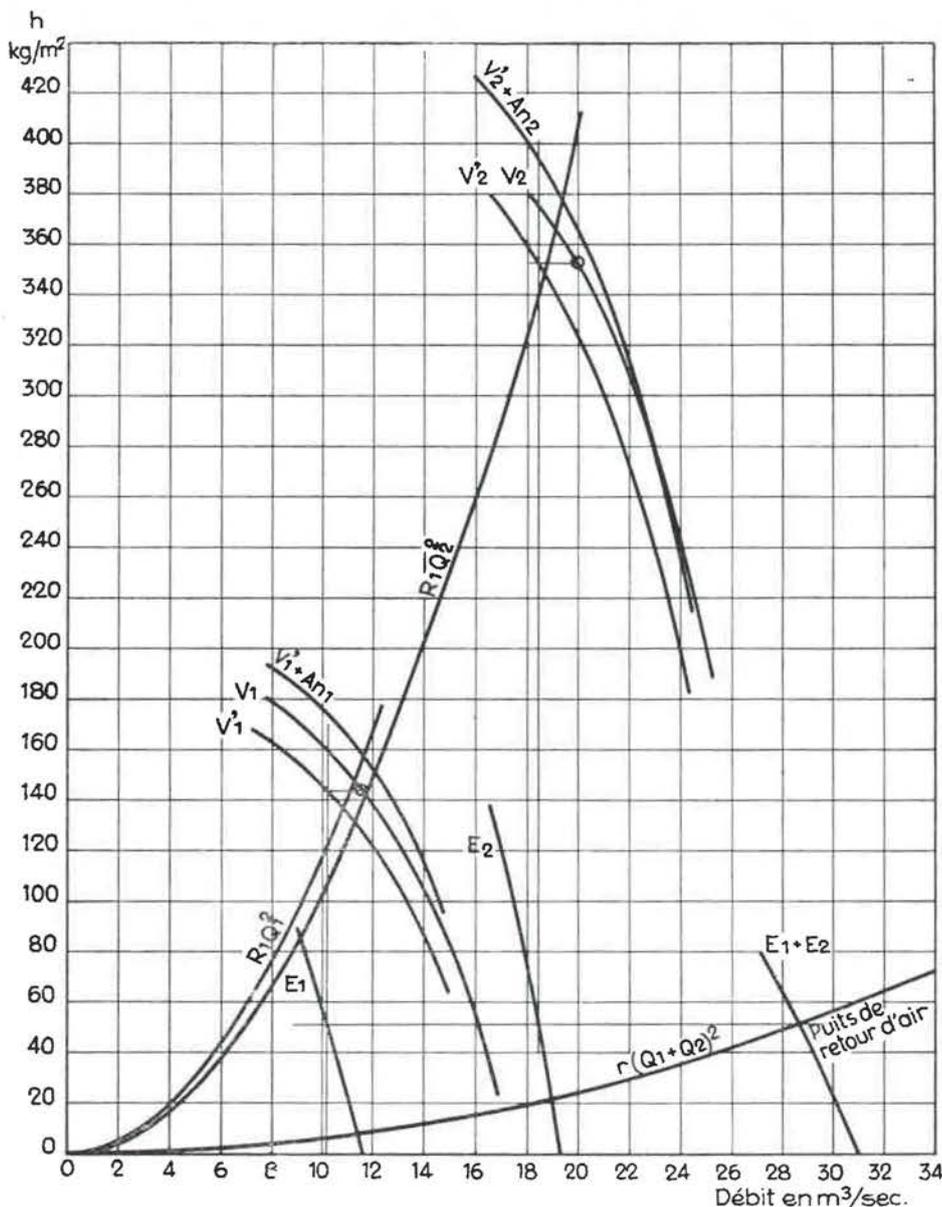


Fig. 15.

Les diagrammes (fig. 11 et 12) donnent les caractéristiques de fonctionnement de chacun des deux ventilateurs.

Pour chacun des circuits 1 et 2, on détermine la caractéristique utile de la force aéromotrice totale en soustrayant, de la caractéristique du ventilateur, la perte au by-pass et en ajoutant ensuite l'aérage naturel.

En résumé, nous avons donc :

Circuit 1 :	
Perte de charge totale	121,24 kg/m^2
Aérage naturel	29,68 kg/m^2
Débit utile	10,1 m^3/sec
Fuite au by-pass	1,38 m^3/sec

Circuit 2 :	
Perte de charge totale	340,57 kg/m^2
Aérage naturel	41,1 kg/m^2
Débit utile	18,45 m^3/sec
Fuite au by-pass	1,5 m^3/sec
Puits de retour d'air :	
Perte de charge,	51 kg/m^2
Débit	28,53 m^3/sec

La mise en parallèle des ventilateurs (fig. 13) se fait suivant la méthode classique et l'on peut vérifier que les points de fonctionnement des ventilateurs correspondent bien au fonctionnement réel.

CONCLUSION

Mieux que tout commentaire, les chiffres expriment que la méthode que nous avons adoptée donne

des résultats d'une réelle valeur. Même si l'on peut reprocher à cette méthode certaines sources d'erreurs, l'erreur globale est toutefois minime. Il suffit, pour s'en rendre compte, de remarquer qu'il n'y a pas accumulation des erreurs systématiques ni des erreurs de lecture. Par temps stable, la pression mesurée au retour à l'orifice du puits est la même que la pression au départ.

On peut considérer que les résultats sont, sinon rigoureusement exacts, du moins d'une précision largement suffisante en pratique.

D'autre part, comme nous l'avons déjà souligné, la méthode est extrêmement commode et permet de débrouiller des situations complexes, telles que celles rencontrées dans le charbonnage 2.

Souhaitons que les problèmes de ventilation deviennent familiers à tous les ingénieurs d'exploitation. La ventilation souterraine n'est pas seulement un des chapitres fondamentaux de l'exploitation des mines, son étude approfondie est aussi fertile en enseignements pratiques et scientifiques.