

# Ventilation minière

## Calcul des réseaux maillés

par

O. de CROMBRUGGHE et J. REMACLE

Service Etudes et Organisation du Travail - Fond  
des Charbonnages de Winterslag.

### SAMENVATTING

De ventilatienetten kunnen ingedeeld worden enerzijds in vertakte netten (fig. 2), waar de hoofdstroom zich achtereenvolgens in deelstromen splitst, die dan in de omgekeerde volgorde terug bijeen komen, anderzijds in vermaasde netten (fig. 7), waar de deelstromen onderling door dwarse vertakkingen verbonden worden.

Voor vermaasde netten is de klassieke theorie van de equivalente opening en van de serie-parallel schakelingen ontoereikend.

Voor die gevallen kan men een aritmetische methode met achtereenvolgende benaderingen toepassen. Deze methode vertoont gelijkenis met de berekeningswijze van Hardy Cross (voor hyperstatische constructies toegepast), en werd voor het eerst door de Engelsen Scott en Hinsley beschreven.

Aan een willekeurig aangenomen verdeling van de luchtdebieten worden stapsgewijze correcties aangebracht, zodat aan de stromingswetten telkens met een betere benadering voldaan wordt. Die methode is zeer soepel, maar, wanneer het net uitgebreid is, worden de berekeningen zo omvangrijk dat zij met de gewone middelen praktisch niet meer uit te voeren zijn.

Hier brachten de elektronische breinen of « Ordinatoren » de oplossing. De toepassing van de Ordinator I.B.M.-650 op de ventilatieproblemen werd door de Kolenmijnen van Winterslag bestudeerd en maakte, volgens het proces dat in deze nota beschreven wordt, de berekening van een ventilatienet met 63 mazen mogelijk.

Waar de berekening met de hand maanden zou duren, wordt het met de Ordinator een zaak van minuten. De nauwkeurigheid kan ver boven de behoeften opgedreven worden.

De gegevens worden vooraf in mekanografische kaarten geponst. De uitslagen komen onder dezelfde vorm uit de machine doch kunnen automatisch vertolkt worden.

Met dezelfde methode kunnen eveneens andere netvraagstukken behandeld worden (perslucht, gas, waternetten, enz...). De omvang van deze problemen wordt niet meer begrensd door de rekenprocessen, doch uitsluitend door de mogelijkheid om in een aanneembare tijd al de gegevens te kunnen meten en in cijfers uitdrukken.

### RESUME

Les réseaux de ventilation se classent en réseaux ramifiés (fig. 2), où le courant d'air se subdivise successivement en courants partiels qui se réunissent ensuite dans l'ordre inverse, et en réseaux maillés (fig. 7), où les différents circuits sont reliés par des branchements diagonaux.

La théorie classique de l'orifice équivalent et des connexions série-parallèle ne permet pas la résolution des réseaux maillés. On peut appliquer dans ce cas une méthode numérique par approximations successives, analogue à celle de Cross pour les constructions hyperstatiques. Cette méthode a été décrite par les Anglais Scott et Hinsley.

En partant d'une répartition arbitraire des débits, on applique à ceux-ci des corrections systématiques, de façon à satisfaire aux équations de l'écoulement avec des écarts de plus en plus faibles. Cette méthode est très souple, mais pour des réseaux étendus, l'ampleur des calculs devient prohibitive.

Les nouvelles machines à calculer électroniques ou « ordinateurs » ont ouvert des nouvelles possibilités à cette méthode. L'application de l'ordinateur I.B.M.-650 aux problèmes de ventilation a été étudiée par les Charbonnages de Winterslag et a permis le calcul d'un réseau de 63 mailles suivant le processus développé dans la présente note.

Des calculs qui demanderaient des mois par les méthodes manuelles se font en quelques minutes sur l'Ordinateur. La précision dépasse largement les besoins.

Les données doivent être perforées au préalable dans des cartes mécanographiques. Les résultats sont fournis sous la même forme, mais peuvent être tabulés mécaniquement.

La même méthode est applicable à d'autres problèmes de réseaux (air comprimé, gaz, eau, etc...). L'ampleur de ces problèmes n'est plus limitée par le volume des calculs nécessaires, mais par la possibilité d'effectuer en temps utile les mesures nécessaires pour exprimer en chiffres les données du problème.

## TABLE DES MATIERES

0. Introduction.		5. Mise en œuvre pratique.	
00. Position du problème.	876	50. Schéma de la mine.	894
01. Réseaux maillés.	876	51. Mesures.	894
02. Méthodes de résolution.	877	52. Calcul des données.	895
03. Analogies électriques.	877	53. Listing des données.	895
04. Complexité du problème posé.	877	54. Variantes.	895
05. Solution sur l'Ordinateur 650 I.B.M.	877	55. Exécution du calcul.	895
06. Schéma de la note.	878	56. Dépouillement.	896
1. Notions classiques et notations.		6. Conclusions.	
10. Définitions.	878	60. Domaine d'application de la méthode.	896
11. Relation entre débit et perte de charge	879	61. Remerciements.	896
12. Résistance - Orifice équivalent et « Conductance »	879		
13. Connexions série et parallèle.	880		
14. Branchements avec ventilateurs.	881		
15. Branchements inclinés.	882		
16. Fuites.	883		
2. Réseaux maillés.			
20. Position du problème.	883		
21. Conditions mathématiques.	884		
22. Résolution par approximations successives	885		
23. Exemple de calcul.	887		
3. L'Ordinateur I.B.M. 650.			
30. Définitions.	889		
31. Parties constitutives.	889		
32. Schéma logique.	890		
33. Rédaction des instructions.	891		
34. Codes symboliques.	892		
4. Résolution par l'Ordinateur, du problème de ventilation.			
40. Chargement du tambour.	892		
41. Organigramme.	893		
42. Temps de résolution.	894		

## 0. INTRODUCTION

00. Le problème de la répartition du courant d'air dans un système de galeries souterraines est d'une importance pratique primordiale et fait l'objet d'exposés plus ou moins développés dans tous les cours d'exploitation des mines. On constate cependant que les exemples traités comportent la plupart du temps un ensemble de branchements reliés les uns avec les autres, soit en série, soit en parallèle, soit suivant une combinaison de raccordements en série et en parallèle.

Comme nous le rappellerons ci-après, des réseaux pareils peuvent être facilement simplifiés de proche en proche en utilisant les notions classiques de résistance et d'orifice équivalent, et, si les formules analytiques obtenues paraissent compliquées, les calculs numériques sont en fait assez simples. D'élégantes méthodes graphiques permettent d'ailleurs d'éviter ces calculs et peuvent de plus tenir compte de la forme exacte de la caractéristique débit-pression des ventilateurs, que le calcul est nécessairement obligé de simplifier.

01. Il existe cependant des réseaux dits « maillés » qui ne se laissent pas résoudre en une combinaison de raccordements série et parallèle. En principe, la résolution de pareils réseaux dépend de celle d'un système d'équations simultanées dont la

plupart sont du 2<sup>me</sup> degré. On conçoit que cette résolution analytique ne soit pratiquement possible que pour des cas très simples. En fait, on aura recours à des méthodes d'approximations successives.

02. Ces dernières méthodes sont cependant peu connues. Les Anglais Scott et Hinsley en ont décrit une en détail dans « Transactions of the Institution of Mining Engineers » (mars 1952), mais cette description n'a pas été reprise par la littérature en langue française. C'est la méthode de Scott et Hinsley que l'un de nous a eu l'occasion d'étudier en 1953 à l'Institut National de l'Industrie Charbonnière.

Nous avons eu, en 1956 et 1957, l'occasion de l'appliquer avec succès à des problèmes partiels qui se posaient au Charbonnage de Winterslag (réseau d'une dizaine de mailles, 5 jours de calculs).

Cette méthode est précieuse, mais l'importance du travail de calcul croît rapidement avec la complexité du réseau à traiter. Un réseau d'une quinzaine de mailles nous semble constituer la limite pratique d'utilisation.

03. Pour les cas plus complexes, il faut avoir recours aux modèles analogiques électriques. Ceux-ci sont de deux sortes :

a) les modèles composés de résistances à caractéristique quadratique ou à réglage automatique (Staatsmijnen, Montan Forschung, appareil américain à tubes spéciaux) qui, le montage effectué, donnent instantanément la solution du problème ;

b) les modèles composés de résistances à réglage manuel (Scott, Institut d'Hygiène des Mines, Fauquemont) que l'on ajuste pas à pas, avec ou sans calculs intermédiaires.

Si le montage de ces modèles est parfois assez laborieux, ils ont le gros avantage, une fois ce montage réalisé, de permettre de traiter rapidement un grand nombre de variantes du problème étudié.

C'est ainsi que le calcul du problème cité au par. 02 a été vérifié sur le modèle analogique de l'Institut d'Hygiène des Mines de Hasselt (montage et mise en route : 2 jours — résolution proprement dite : 1/2 jour). La concordance s'est révélée excellente.

Le modèle a permis de plus de résoudre rapidement une demi-douzaine de variantes de ce problème (1/2 journée par variante), alors qu'il aurait chaque fois fallu recommencer tout le calcul par approximations successives si l'on n'avait pas disposé du modèle.

L'exactitude des prévisions basées sur l'une ou l'autre des deux méthodes a pu être constatée expérimentalement quelques mois plus tard, lors de la mise en service d'un nouveau ventilateur souterrain dans le circuit étudié.

04. L'étude de la mise en service d'un nouveau ventilateur principal au Charbonnage de Winterslag et la prédétermination des modifications de l'aérage qui en résulteraient nous ont placés au début de 1958 devant un problème beaucoup plus vaste que ceux que nous avons eu à traiter jusqu'alors. Il fallait en effet étendre le calcul à la mine toute entière, dont la structure, au point de vue ventilation, est assez complexe.

En effet, l'exploitation se fait à trois étages, ayant chacun leurs réseaux de boueux d'entrée et de retour d'air, et elle s'étend jusqu'à 6 km des puits. Certains retours d'air sont dédoublés, et il existe de nombreuses mises en parallèle entre étages. Plusieurs ventilateurs souterrains de 60 ou 180 ch corrigent la répartition de l'air entre les différents quartiers et relaient l'action du ventilateur de surface.

Grâce à ces dispositions, l'orifice équivalent de la mine est voisin de 7 m<sup>2</sup> malgré la distance, mais la présence des mises en parallèle et de branchements diagonaux complique le calcul, et l'étude du réseau nous a amenés à tracer un schéma « simplifié » comportant 151 branchements et 63 mailles.

La multiplicité des données à traiter et la nécessité de tenir compte d'une manière précise du comportement des ventilateurs souterrains dépassaient les possibilités des modèles analogiques dont nous aurions pu disposer. La seule alternative possible était la méthode par approximations successives, à condition que celle-ci put être mise en œuvre par une machine à calculer extrêmement rapide.

La Direction du Charbonnage de Winterslag nous avait fait participer à un séminaire de 5 jours sur l'utilisation de l'Ordinateur électronique 650 de l'International Business Machines (I.B.M.).

Cette machine, par la capacité de sa mémoire magnétique, la facilité d'accès aux données enregistrées dans cette mémoire, la rapidité avec laquelle elle effectue (par voie électronique) les opérations arithmétiques, et la souplesse de ses tests logiques, paraissait tout indiquée pour ce genre d'applications. Nous avons donc étudié la « mise sur machine » du procédé de résolution par approximations successives et avons élaboré le « programme », ou liste des instructions à fournir à la machine pour lui permettre d'effectuer le calcul.

05. La mise au point finale de ce programme a été faite en collaboration avec les ingénieurs de l'I.B.M. et le Service Etude et Méthodes de la Société Métallurgique d'Espérance-Longdoz. Celui-ci a assuré de plus la perforation d'un millier de cartes contenant les données et le programme.

Le problème a été traité sur l'Ordinateur 650 du Centre I.B.M. de Bruxelles, grâce à un crédit d'heures gracieusement mis à notre disposition par la Direction de la S.M. Espérance-Longdoz et à

l'assistance technique des programmeurs de cette Société, à laquelle nous sommes profondément re-connaissants.

Les résultats obtenus en quelques heures sur l'Ordinateur correspondent au but poursuivi. L'étude des 10 variantes proposées aurait demandé des années de calcul manuel ou aurait nécessité la construction d'un modèle analogique spécialement conçu.

06. La présente note rappellera d'abord quelques notions de base et précisera les notations utilisées. Elle exposera ensuite la méthode par approximations successives pour la résolution de réseaux maillés. Nous décrirons alors sommairement l'ordinateur et le principe de son fonctionnement, et nous montrerons comment la méthode de calcul par approximation a été « mise sur la machine ».

Pour terminer, nous tâcherons, sans entrer dans les détails particuliers au réseau étudié, de donner une idée générale des travaux effectués et de l'importance des résultats obtenus.

## 1. NOTIONS CLASSIQUES ET NOTATIONS

### 10. Définitions.

100. Un réseau de ventilation minière est constitué par un ensemble de galeries de longueurs et de sections diverses, dans lesquelles l'air circule sous l'action d'un ou de plusieurs ventilateurs installés, soit à la surface, soit dans certaines galeries.

L'action des ventilateurs peut être renforcée ou contrariée par le tirage naturel.

D'autre part, à l'air de ventilation proprement dit peuvent s'ajouter l'échappement des machines à air comprimé, ou d'autres gaz (grisou, vapeur d'eau).

101. On appelle nœud du réseau tout point de jonction de plusieurs galeries où le courant d'air se subdivise en plusieurs courants partiels, ou bien où plusieurs courants partiels se réunissent en un courant unique.

Chaque nœud est caractérisé par la pression qui y règne.

La pression absolue, mesurée par exemple par un baromètre, doit être corrigée en fonction des variations dans le temps de la pression atmosphérique, et réduite en fonction de l'altitude du point considéré.

Pour effectuer cette réduction, il faudra tabler sur un poids spécifique de l'air qui soit fonction uniquement de la profondeur (On peut prendre par exemple le poids spécifique moyen de l'air contenu dans le puits d'entrée d'air entre la surface et la profondeur considérée).

Soit  $P_A$  la pression absolue au nœuds ;

$Z_A$  la profondeur de ce point (comptée positivement vers le bas) ;

$\gamma'$  le poids spécifique de l'air dans le puits d'entrée à la profondeur  $Z$  ;

$\bar{\gamma}'_{0A}$  le poids spécifique moyen de l'air dans le puits d'entrée d'air entre la surface et la profondeur  $Z_A$ .

La pression réduite  $p_A$  sera :

$$p_A = P_A - \int_0^{Z_A} \gamma' dZ = P_A - Z_A \bar{\gamma}'_{0A}$$

On exprimera  $Z$  en mètres,  $\gamma'$  en  $\text{kg/m}^3$ ,  $P$  et  $p$  en  $\text{kg/m}^2$ .

Si de la pression réduite de chaque nœud nous soustrayons une constante, égale par exemple à la pression réduite d'un point choisi comme référence, nous obtenons les pressions relatives par rapport au point de référence.

102. On appelle branchement du réseau toute portion de galerie ou toute succession de galeries comprises entre deux nœuds successifs.

Chaque branchement est caractérisé par le débit d'air  $Q$ , exprimé en  $\text{m}^3/\text{sec}$ , qui le parcourt (débit volumétrique, corrigé en fonction de la pression et de la température).

Pour chaque branchement, on choisit un sens direct, par exemple de (A) vers (B) pour le branchement reliant les nœuds (A) et (B), et un sens inverse (de B vers A). Le débit  $Q$  sera considéré comme positif si l'air se dirige de (A) vers (B) et comme négatif dans le cas contraire.

Nous noterons  $H$  (en  $\text{kg/m}^2$  ou, ce qui revient au même, en mm de colonne d'eau) l'augmentation ou la diminution  $p_B - p_A$  de la pression réduite de l'air que l'on constate quand on parcourt dans le sens direct le branchement considéré.

Pour les branchements horizontaux,  $H$  représente la somme algébrique des forces aéromotrices des ventilateurs éventuellement installés dans le branchement et des pertes de charge (dans lesquelles nous incluons les variations d'énergie cinétique de l'air, dues aux variations de section).

Pour des branchements inclinés où la température de l'air différerait notablement de celle du puits d'entrée d'air,  $H$  comprendrait un terme complémentaire représentant l'effet du tirage naturel (\*) (voir par. 15).

103. Enfin, on appelle maille tout circuit fermé parcouru dans le réseau (sans tenir compte du sens

(\*)  $H$  serait mesuré par un tube en U rempli d'eau et relié aux deux extrémités du branchement considéré par des flexibles remplis d'air à la même densité que celui du puits d'entrée d'air au même niveau.

de circulation de l'air) en empruntant successivement un certain nombre de branchements. La maille pouvant être parcourue dans deux sens, on en choisira un comme positif (par exemple celui des aiguilles d'une montre). En parcourant la maille dans le sens positif, on peut rencontrer les branchements successifs dans le sens direct aussi bien que dans le sens inverse. Un même branchement peut faire partie de plusieurs mailles différentes et intervenir dans le parcours de ces mailles, tantôt dans le sens direct, tantôt dans le sens inverse.

104. Notons enfin que l'atmosphère extérieure peut être considérée comme un nœud relié à l'orifice de chaque puits par un branchement fictif.

**11. Relation entre débit et perte de charge.**

110. Sans entrer dans le détail de la théorie de l'écoulement des fluides, il nous suffira d'admettre ici que la perte de charge dans une galerie de mine est, en valeur absolue, proportionnelle au carré du débit, ce que l'on écrit généralement sous la forme de l'équation :

$$|H| = K Q^2 \quad (1)$$

Le coefficient K, ou résistance aérodynamique, dépend de la longueur et de la section de la galerie, ainsi que de la rugosité des parois et de l'alignement des différentes sections. En toute rigueur, K et l'exposant de Q varient également en fonction du nombre de Reynolds  $R_e$  caractérisant l'écoulement (et donc en fonction de la vitesse de l'air) ; mais, étant donné l'ordre de grandeur de  $R_e$  pour des galeries de mine, cette influence est peu sensible, et peut être négligée vis-à-vis de l'imprécision des coefficients de rugosité et des procédés de mesure utilisés.

111. Si l'on veut tenir compte du signe de H, il faut écrire l'équation (1) sous une autre forme.

Soit un branchement sans ventilateur dont le sens direct est A—B. S'il est parcouru par l'air de (A) vers (B), le débit Q sera positif, mais la pression sera plus faible en (B) qu'en (A). Donc, H, qui, par définition, est égal à  $p_B - p_A$ , sera négatif.

Si, par contre, l'air circule de B vers A, le débit Q sera négatif et H sera positif.

La différence de pression H aura donc toujours, pour un branchement qui ne comporte pas de ventilateur, un signe opposé à celui du débit Q, ce qu'on exprimera en écrivant l'équation (1) comme suit :

$$H = -K Q |Q| \quad (2)$$

Le coefficient K restant toujours positif.

La courbe caractéristique d'une galerie sera donc analogue à la courbe (a) de la figure 1. Elle sera composée de deux demi-paraboles occupant respectivement le 2<sup>me</sup> et le 4<sup>me</sup> quadrant des axes de coordonnées.

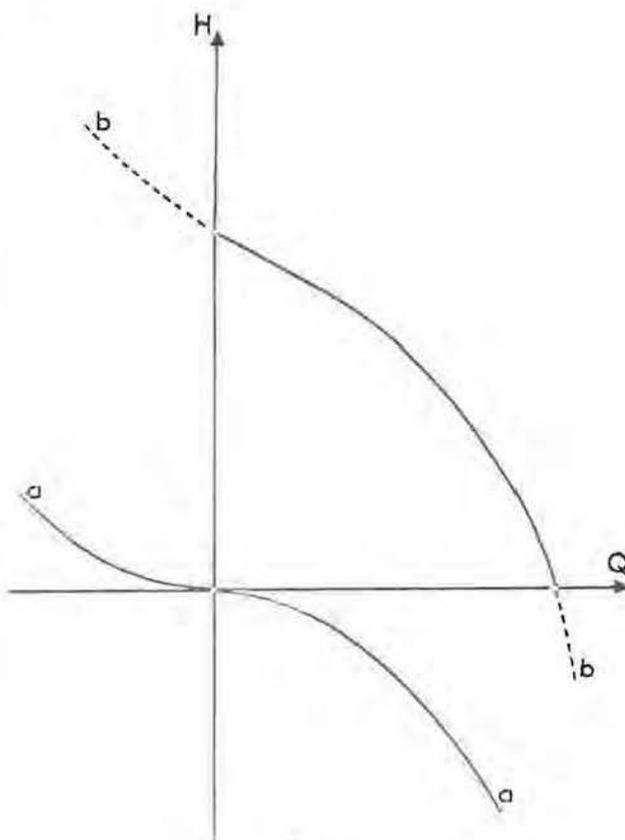


Fig. 1.

**12. Résistance, Orifice équivalent et « Conductance ».**

120. La résistance aérodynamique est le coefficient K introduit ci-dessus. On le calcule à partir des mesures de débit et de pression en explicitant l'équation (1) par rapport à K :

$$K = \frac{|H|}{Q^2} \quad (3)$$

Si H est exprimé en mm, C.E. et Q en m<sup>3</sup>/s, on obtient K en kilomurgues.

Si la mesure directe n'est pas possible, K peut être calculé par comparaison avec la résistance de galeries analogues en tenant compte du fait que ce coefficient est proportionnel à la longueur et inversement proportionnel à la 5<sup>me</sup> puissance des dimensions transversales (diamètre) de la galerie.

121. On utilise souvent, pour caractériser l'aptitude d'une galerie à véhiculer de l'air, le concept d'orifice équivalent a, exprimé en m<sup>2</sup>. L'orifice équi-

valent est l'ouverture en mince paroi offrant la même résistance au courant d'air que la galerie considérée. Il est donné par la formule :

$$a = \frac{0,38 Q}{\sqrt{H}} = \frac{0,38}{\sqrt{K}} \quad (4)$$

122. Si l'orifice équivalent revient souvent dans les calculs, et si l'on n'attache pas d'importance à l'image physique qu'il représente, on peut laisser tomber le facteur constant 0,38 et définir comme en électricité une « conductance » C :

$$C = \frac{a}{0,38} = \frac{Q}{\sqrt{H}} = \frac{1}{\sqrt{K}} \quad (5)$$

13. Connexions série et parallèle.

130. Si deux galeries a et b sont reliées en série (fig. 2), elles sont parcourues par un même débit Q, mais provoquent des pertes de charges H<sub>a</sub> et H<sub>b</sub>. On a dans ce cas :

$$\begin{aligned} Q_a &= Q_b = Q \\ H_{ab} &= H_a + H_b \\ \frac{H_{ab}}{Q^2} &= \frac{H_a}{Q^2} + \frac{H_b}{Q^2} \\ K_{ab} &= K_a + K_b \end{aligned}$$

Comme en électricité, la résistance totale de deux galeries en série est donc égale à la somme des résistances individuelles. Ceci reste vrai pour 3, 4, ... n galeries en série.

$$\left. \begin{matrix} C_c \\ C_d \end{matrix} \right\} C_{c/d} \longrightarrow \left. \begin{matrix} K_a \\ K_b \end{matrix} \right\} K_{a,b} \longrightarrow C_{a,b} \quad \left| \quad \left. \begin{matrix} C_{a,b} \\ C_{c/d} \end{matrix} \right\} C_{a,b,c,d} \longrightarrow \left. \begin{matrix} K_{a,b} \\ K_{c,d} \end{matrix} \right\} K_{a,b,c,d}$$

A partir de la résistance K<sub>ab</sub> on peut calculer la conductance

$$C_{ab} = \frac{1}{\sqrt{K_{ab}}}$$

131. Si deux galeries c et d sont reliées en parallèle (fig. 2) elles sont soumises à une même dé-

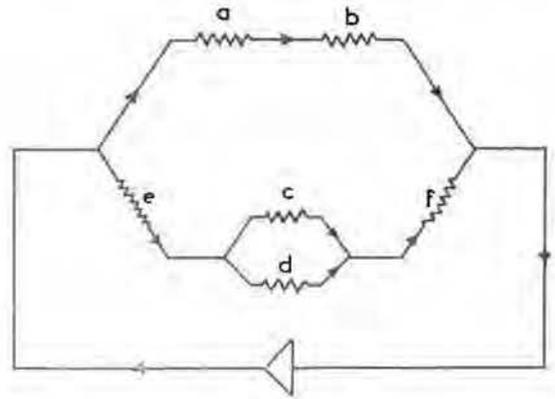


Fig. 2.

pression H, mais sont parcourues par des débits Q<sub>c</sub> et Q<sub>d</sub>. On a alors :

$$\begin{aligned} H_c &= H_d = H \\ Q_{c/d} &= Q_c + Q_d \\ \frac{Q_{c/d}}{\sqrt{H}} &= \frac{Q_c}{\sqrt{H}} + \frac{Q_d}{\sqrt{H}} \\ C_{c/d} &= C_c + C_d \end{aligned}$$

A partir de la conductance C<sub>c/d</sub> on peut calculer la résistance K<sub>c/d</sub> :

$$K_{c/d} = \frac{1}{(C_{c/d})^2}$$

132. Si un réseau, tel que celui de la figure 2, est décomposable entièrement en branchements série et parallèle, il est facile de le simplifier de proche en proche groupant ensemble les branchements en parallèle ou en série.

Par exemple, pour le cas de la figure 2, la simplification se fera suivant le schéma ci-dessous :

Ce schéma n'est applicable que si la structure du réseau s'y prête et si chaque branchement a une caractéristique quadratique du type défini au par. 11. Il ne peut donc y avoir aucun ventilateur dans les branchements ainsi traités.

133. Les opérations décrites ci-dessus sous forme analytique peuvent également s'effectuer par

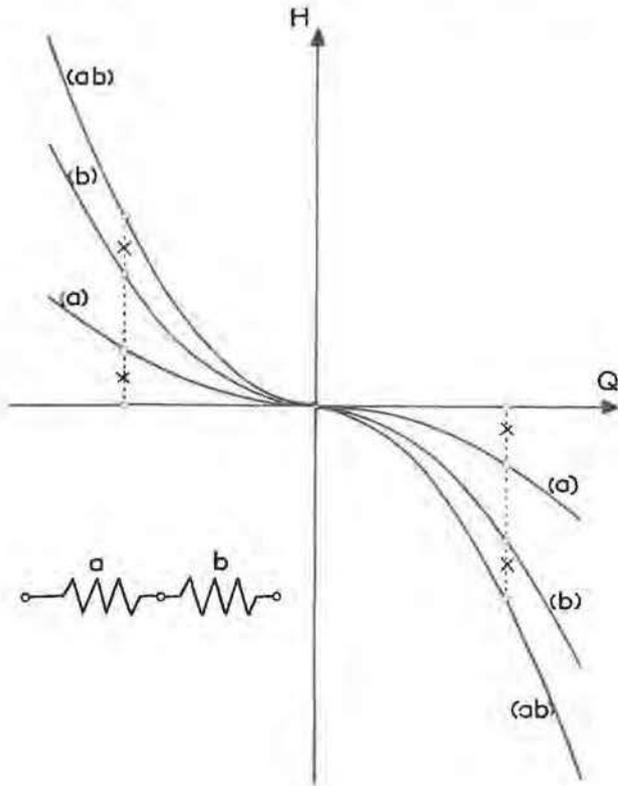


Fig. 3.

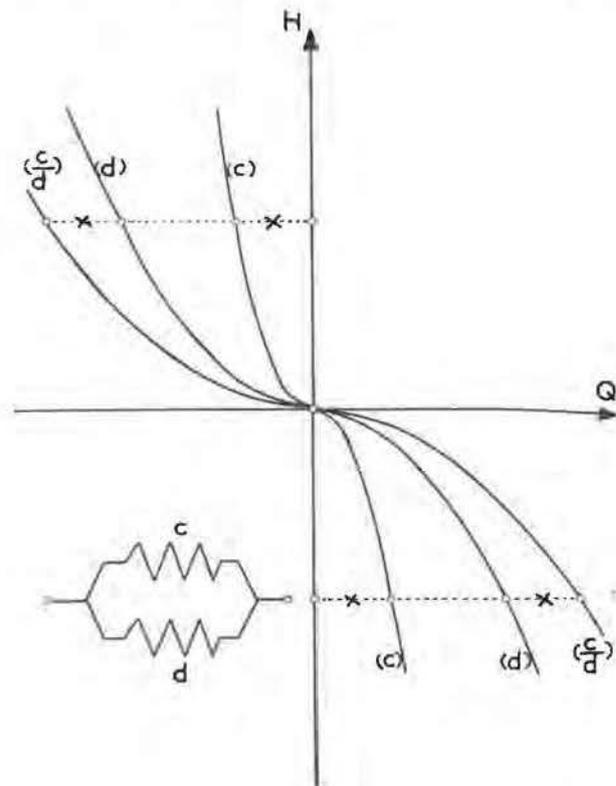


Fig. 4.

voie graphique. Si l'on connaît les courbes caractéristiques de deux branchements en série, on construit le graphique résultant en additionnant point par point les ordonnées des courbes des deux composants (fig. 3). Pour deux branchements en parallèle, ce sont les abscisses que l'on additionne point par point (fig. 4).

sultante d'un ventilateur (courbe v) avec un by-pass en parallèle (courbe b) et une galerie résistante en série (s).

Pour plus de détails sur cette méthode, nous renvoyons aux références [1] à [6] de la bibliographie.

14. Branchements avec ventilateurs.

140. Si un branchement contient un ventilateur, sa caractéristique ne correspond plus à l'équation (2) et on ne peut plus parler de résistance ni d'orifice équivalent. La courbe de H en fonction de Q aura l'allure de la courbe (b) de la figure 1. La partie utile de cette courbe se trouve dans le premier quadrant : en effet, si le ventilateur est efficace, on doit constater, en le traversant dans le sens du débit, une augmentation de pression et non une perte de charge.

141. Les caractéristiques des ventilateurs sont généralement connues sous forme graphique (courbes fournies par le constructeur). C'est donc la méthode du par. 135 qu'il conviendra d'appliquer pour combiner des branchements en série-parallèle comportant des ventilateurs. A titre d'exemple, la figure 5 montre la construction de la caractéristique ré-

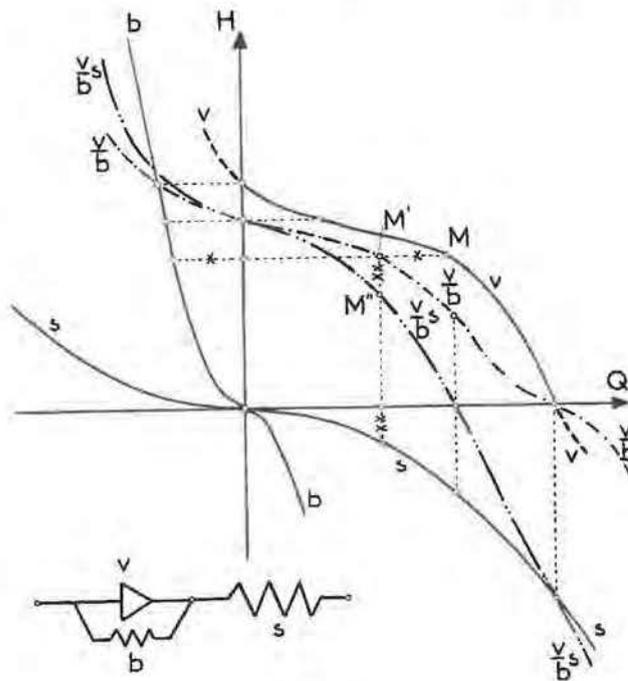


Fig. 5.

142. On peut, d'autre part, à partir de la courbe du ventilateur (fig. 6, courbe *v*), calculer une équation qui représente cette courbe d'une façon aussi approchée que possible, tout au moins dans le domaine de son utilisation pratique. En général, une équation du second degré donne une précision largement suffisante. Nous pouvons adopter par exemple une équation du type :

$$H = V - LQ - K |Q| Q \quad (6)$$

(fig. 6, courbe *b*)

dans laquelle les coefficients constants *V*, *L* et *K* sont choisis de façon que la courbe *b* s'écarte aussi peu que possible de la courbe expérimentale *v*.

Le terme  $K |Q| Q$  de l'équation (6) est analogue à celui de l'équation (2). On voit que la courbe *b* se compose de deux demi-paraboles

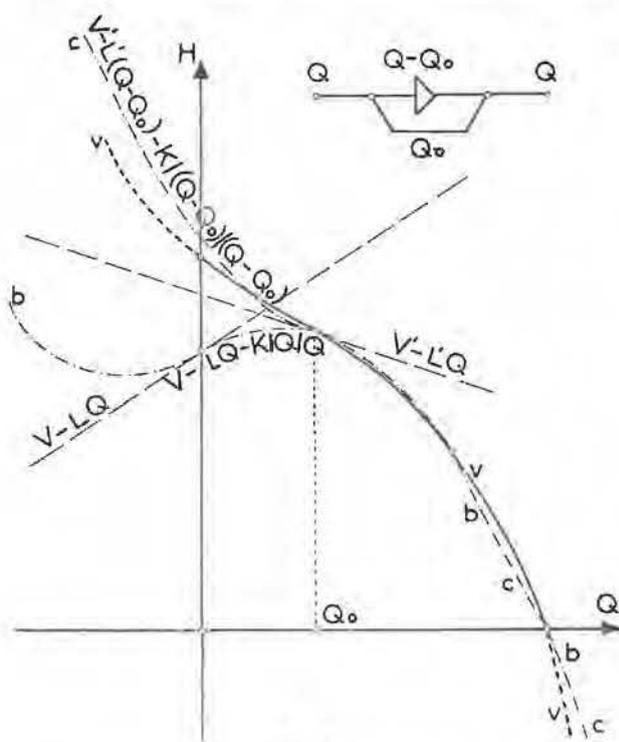


Fig. 6.

qui se raccordent en un point d'inflexion pour  $Q = 0$  ; la tangente à la courbe en ce point a pour équation  $H = V - LQ$  (*L* est négatif dans le cas représenté).

143. La coïncidence entre les courbes *v* et *b* est d'autant moins bonne qu'on s'éloigne plus du domaine de fonctionnement normal du ventilateur.

On peut cependant améliorer cette coïncidence et respecter la position du point d'inflexion de la caractéristique expérimentale au moyen de l'artifice suivant.

Soit  $Q_0$  l'abscisse du point d'inflexion de la courbe *v*. Nous remplaçons le ventilateur par un en-

semble comportant, d'une part, une dérivation parcourue par un débit constant  $Q_0$  et, d'autre part, un ventilateur fictif traversé par le débit  $Q - Q_0$ , pour lequel nous calculons une caractéristique :

$$H = V' - L' (Q - Q_0) - K | (Q - Q_0) | (Q - Q_0) \quad (7)$$

où de nouvelles valeurs  $V'$  et  $L'$  ont remplacé  $L$  et  $V$ ,  $K$  restant inchangé. La courbe *c* de la figure 6 représente la nouvelle relation  $H = f(Q - Q_0)$ .

Dans tous les calculs interviendra seule la valeur  $Q - Q_0$ , l'équilibre des débits étant réalisé par un prélèvement et une injection à débit constant  $Q_0$ , respectivement en amont et en aval du ventilateur. Lors de l'interprétation, on recombina les débits  $(Q - Q_0)$  et  $Q_0$  pour restituer le comportement réel du ventilateur.

144. Ces expressions des caractéristiques de ventilateurs sont de peu d'utilité pour le calcul analytique de branchements en parallèle. En effet, pour effectuer la sommation point par point des abscisses, il faut résoudre les équations (6) et (7) par rapport à  $Q$ , ce qui introduit des radicaux dans les expressions, et mène bientôt à des complications inextricables.

Par contre, ces expressions sont indispensables pour transposer les caractéristiques des ventilateurs sur une analogie électrique ou sur un ordinateur électronique.

## 15. Branchements inclinés.

150. Si nous considérons les pressions absolues  $P_A$  et  $P_B$  régnant aux extrémités *A* et *B* d'un branchement incliné (sens direct *A* — *B*), rempli d'air de poids spécifique  $\gamma$ , la différence  $P_B - P_A$  entre ces pressions se compose :

- a) d'un terme négatif  $H_f$  dû aux pertes de charge proprement dites (travaux de frottement) ;
- b) d'un terme  $H_v$  dû éventuellement à l'action d'un ventilateur ;
- c) d'un terme représentant le poids de la colonne d'air séparant les points *A* et *B* :

$$\int_A^B \gamma dZ$$

$\gamma$  est le poids spécifique de l'air dans le branchement *AB* (en  $\text{kg/m}^3$ ),  $Z$  est la profondeur, en mètres, comptée positivement vers le bas.

151. La différence des pressions absolues vaut donc (en  $\text{kg/m}^2$ ) :

$$P_B - P_A = H_f + H_v + \int_A^B \gamma dZ.$$

En substituant aux pressions absolues les pressions réduites (par. 101), on trouve :

$$p_B + \int_0^B \gamma' dZ - (p_A + \int_0^A \gamma' dZ) = H_f + H_v + \int_A^B \gamma dZ$$

d'où :

$$p_B - p_A + \int_A^B \gamma' dZ = H_f + H_v + \int_A^B \gamma dZ$$

$$H = p_B - p_A = H_f + H_v + \int_A^B (\gamma - \gamma') dZ$$

Pratiquement, les variations de  $\gamma$  n'étant pas très grandes, on pourra remplacer l'intégrale par le produit :

$$(\bar{\gamma}_{AB} - \bar{\gamma}'_{AB}) (Z_B - Z_A) = H_n$$

où  $\bar{\gamma}_{AB}$  est le poids spécifique moyen de l'air dans le branchement AB (en kg/m<sup>3</sup>),

$\bar{\gamma}'_{AB}$  le poids spécifique moyen de l'air dans le puits d'entrée d'air entre les niveaux de A et B (en kg/m<sup>3</sup>)

$Z_B$  et  $Z_A$  les profondeurs respectives, en mètres, des points A et B.

On voit que le produit  $H_n$  sera nul ou négligeable :

si la différence de niveau entre les points A et B est nulle ou faible ;

si la différence de température entre le branchement AB et la section correspondante du puits d'entrée d'air est faible ou négligeable.

152. En particulier, si le branchement AB ne contient pas de ventilateur, sa caractéristique s'écrira sous la forme :

$$H = H_f + H_n$$

ou

$$H = -K |Q| Q + H_n$$

Cette forme rentre dans le cadre de l'équation (6) dans laquelle on ferait  $L = 0$  et  $V = H_n$ .

153. La formule écrite au paragraphe précédent semble localiser l'action du tirage naturel dans un branchement.

Bien entendu, le tirage naturel n'a physiquement de sens que pour l'ensemble d'un circuit fermé. Pour un tel circuit (M), cette action aura pour valeur la somme algébrique des valeurs  $H_n$  propres aux branchements constituant le circuit fermé :

$$\begin{aligned} \sum H_n &= \sum \int (\gamma - \gamma') dZ \\ &= \int_{(M)} (\gamma - \gamma') dZ \\ &= \int_{(M)} \gamma dZ - \int_{(M)} \gamma' dZ \\ &= \int_{(M)} \gamma dZ \end{aligned}$$

En effet, l'intégrale curviligne  $\int_{(M)} \gamma' dZ$ , calculée sur le contour fermé (M), est nulle, puisque  $\gamma'$  dépend uniquement de la profondeur.

On voit que, si les valeurs  $H_n$  des branchements pris séparément dépendent du choix de la fonction  $\gamma' = f(Z)$ , par contre la somme  $\sum H_n$  calculée sur un circuit fermé en est indépendante. On pourrait donc prendre, pour  $\gamma'$ , au lieu de la densité de l'air dans le puits d'entrée d'air, celle du puits de retour d'air, ou toute autre fonction de la profondeur.

On obtiendra donc, suivant l'hypothèse choisie, des valeurs  $H_n$  différentes, mais la somme relative à un circuit fermé déterminé restera toujours la même.

Ce procédé nous permet de calculer le tirage naturel dans une maille quelconque à partir des valeurs  $H_n$  déterminées pour un nombre limité de branchements, au lieu de devoir recalculer l'intégrale  $\int_{(M)} \gamma dZ$  pour toutes les mailles possibles.

### 16. Fuites.

A l'air qui circule dans les galeries ouvertes viennent s'ajouter des fuites diverses (sas, portes, chantiers en démontage, etc...).

Cet écoulement parasite peut avoir le caractère d'une filtration. Il n'obéit plus dans ce cas à une loi quadratique, mais à une loi linéaire (écoulement laminaire) et se représente alors par une équation

$$H = -LQ$$

qui peut également passer pour un cas particulier de l'équation (6) où l'on aurait fait  $K = 0$  et  $V = 0$ .

On voit donc que cette équation se prête à représenter les cas les plus divers (branchements à écoulement turbulent ou laminaire, ventilateurs et tirage naturel) et qu'on peut généraliser sous cette forme la caractéristique débit-pression d'un branchement absolument quelconque.

## 2. RESEAUX MAILLES

### 20. Position du problème.

De nombreux réseaux ne peuvent être réduits à une combinaison de branchements en série et en parallèle, comme celui de la figure 2.

Dans les réseaux réels, il arrive généralement que certaines parties puissent être simplifiées par les méthodes développées au par. 13, mais il subsiste souvent, après ces simplifications, un canevas maillé irréductible auquel d'autres méthodes doivent être appliquées.

C'est le cas par exemple de celui de la figure 7, dont le schéma est analogue à celui du pont de Wheatstone en électricité.

Ceci se produit d'ailleurs souvent lorsqu'on applique l'aérage diagonal, ou lorsqu'il existe des mises en parallèle importantes entre les différents étages d'un siège.

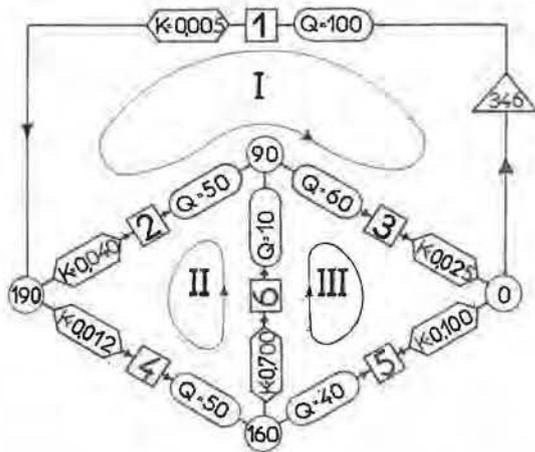
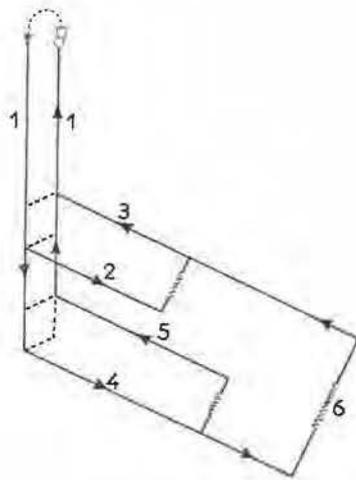


Fig. 7.

Un problème analogue se pose pour les réseaux électriques. Ce dernier cas est cependant plus simple puisque, en électricité, la loi d'Ohm exprime une relation linéaire entre courant et tension, alors qu'en ventilation il s'agit de relations quadratiques. L'analogie de structure entre les deux problèmes a cependant été utilisée pour réaliser des modèles électriques facilitant ou effectuant complètement la résolution du problème de ventilation.

Nous ferons, par contre, ci-après l'étude d'un procédé de résolution purement mathématique.

**21. Conditions mathématiques.**

210. Il s'agit, connaissant les caractéristiques débit-pression de tous les branchements d'un réseau, de calculer quels seront les débits d'air dans chacun de ces branchements, et les pressions réduites en chacun des nœuds,

Si un réseau comporte *b* branchements et *n* nœuds, nous aurons donc comme inconnues *b* débits *Q* et *n* pressions *p*. Cependant, comme les pressions n'interviennent que par leurs différences, elles ne pourront jamais être déterminées qu'à une constante près ; une variation égale de la pression en tous les nœuds ne modifierait pas les débits. Nous pouvons donc choisir arbitrairement la pression en un nœud pris comme point de référence (par exemple l'aspiration du ventilateur principal) et remplacer les pressions réduites par les pressions relatives. Il nous restera donc en fait : *b* + *n* - 1 inconnues.

Ces inconnues sont assujetties à deux sortes de conditions.

211. Elles doivent d'abord respecter les caractéristiques des branchements. Nous obtenons donc *b* équations de la forme :

$$p_B - p_A = (V) - (LQ) - KQ |Q| \quad (8)$$

les termes entre parenthèses n'existant que dans certains branchements (ventilateurs, tirage naturel, fuites laminaires).

212. De plus, les débits doivent s'équilibrer en chaque nœud (condition de continuité), c'est-à-dire qu'en chaque nœud la somme algébrique des débits convergeant vers ce nœud ou s'en écartant doit être nulle (ou égale à une constante représentant les apports d'air comprimé, vapeur d'eau, grisou, etc.). Il y a « *n* » nœuds, donc *n* conditions, mais si les débits sont équilibrés en (*n* - 1) nœuds, ils le seront fatalement aussi dans le *n*<sup>me</sup>, de sorte qu'on ne dispose en fait que de *n* - 1 équations indépendantes de la forme :

$$\sum Q = 0 \text{ (ou } C^{ste}) \quad (9)$$

Nous disposons donc de (*b*) + (*n* - 1) équations pour déterminer *b* + *n* - 1 inconnues.

213. En fait, il est gênant d'avoir, dans chacune des équations du type (8), trois inconnues : les pressions aux deux extrémités du branchement *AB*, et le débit dans ce branchement.

Il est plus avantageux d'utiliser comme inconnues les différences de pression *H* (pertes de charge + force aéromotrice des ventilateurs) propres à chaque branchement. Les équations (8) prennent alors la forme :

$$H = (V) - (LQ) - K |Q| Q \quad (10)$$

et ne contiennent plus que deux inconnues, qui se rapportent exclusivement au branchement considéré.

Mais nous introduisons ainsi les  $b$  nouvelles inconnues  $H$  avec  $b$  équations de condition de la forme :

$$H = p_B - p_A \quad (11)$$

Nous obtenons donc un système de  $2b + n - 1$  équations à  $2b + n - 1$  inconnues, dont il nous faut d'abord éliminer les  $n$  variables  $p$ , qui représentent en fait  $n - 1$  inconnues, puisqu'elles ne sont déterminées qu'à une constante près.

Nous disposons à cet effet des  $b$  équations du type (11) (une par branchement). Il nous restera donc, après élimination des  $p$  :

$$b - (n - 1) = b - n + 1$$

équations de condition reliant les  $H$ . Ces équations seront de la forme :

$$\sum H = 0 \quad (12)$$

Elles expriment que la somme algébrique des différences de pression  $H$ , relatives à une série quelconque de branchements formant un circuit fermé (ou maille), est égale à zéro.

Dans cette somme algébrique, les quantités  $H$  interviennent avec leur signe réel si, en circulant autour de la maille, on parcourt le branchement considéré dans le sens défini comme sens direct (par. 102), et un signe inversé dans le cas contraire.

214. Il nous reste ainsi finalement  $2b$  inconnues : les débits  $Q$  et les différences de pression  $H$  relatifs aux  $b$  branchements, et  $2b$  équations qui sont :

$$n - 1 \text{ équations du type (9) : } (\sum Q = 0)$$

$$b \text{ équations du type (10) : } (H = f(Q))$$

$$\text{et } b - n + 1 \text{ équations du type (12) : } (\sum H = 0).$$

Ceci montre donc que, pour résoudre le réseau, il faut, outre les équations de continuité (9) et les caractéristiques des branchements (10), écrire  $(b - n + 1)$  équations de circulation (12), c'est-à-dire tracer dans le réseau un nombre  $m$  de mailles donné par :

$$m = b - n + 1 \quad (13)$$

Le choix de ces mailles est indéterminé dans une certaine mesure, car le nombre de mailles possibles est très supérieur à  $m$ , mais il n'est cependant pas complètement arbitraire, car il faut que les équations (12) soient indépendantes entre elles : aucune maille ne peut résulter de la combinaison de plusieurs autres mailles déjà considérées.

On constate par ailleurs que, si un réseau se laisse schématiser par une figure plane, sans croisement de branchements, le nombre  $m$  correspond au nombre de cases polygonales délimitées par les branchements constituant le schéma. Dans ce cas particulier, les  $b - n + 1$  cases en question peuvent constituer un système de mailles adéquat pour résoudre le réseau.

Par exemple, le réseau de la figure 7 comporte 6 branchements et 4 nœuds, il faudra y considérer  $6 - 4 + 1 = 3$  mailles.

215. Pour résoudre par voie analytique le système des  $2b$  équations (9) (10) (12), il faudrait :

a) au moyen des  $(n - 1)$  équations linéaires du type (9), éliminer  $(n - 1)$  des  $b$  variables  $Q$  et les exprimer en fonction linéaire des  $b - n + 1$  restantes ;

b) substituer aux  $H$  dans les équations (12) leur expression tirée des équations (10) ;

c) dans les équations (12) modifiées, introduire les nouvelles expressions des  $Q$ .

Il resterait donc finalement  $b - n + 1$  équations à  $b - n + 1$  inconnues, qui seraient généralement du second degré (les expressions (10) étant quadratiques, sauf celles de certains branchements, représentant par exemple des fuites laminaires auxquelles correspond une caractéristique linéaire).

La résolution d'un pareil système est impossible, sauf dans des cas particuliers, l'élimination successive des inconnues faisant chaque fois monter de deux unités le degré des équations restantes. Des difficultés surgiraient de plus à cause de la forme du terme quadratique  $K | Q | Q$ , dont le signe s'inverse en même temps que celui de  $Q$ .

## 22. Résolution par approximations successives.

220. La solution analytique étant impraticable, il reste celle du calcul numérique par approximations successives. Nous appliquerons ici une méthode de relaxation, analogue au procédé de Hardy Cross. Partant d'une répartition arbitraire des débits, on leur appliquera des corrections successives, de façon à satisfaire de mieux en mieux aux équations de circulation (12). Le problème sera considéré comme résolu quand les corrections successives deviendront suffisamment petites pour pouvoir être négligées au point de vue pratique.

221. Comme point de départ, on admettra, dans les différents branchements, une répartition des débits qui peut être arbitraire, à la seule condition de satisfaire en chaque nœud aux équations de continuité (9).

Bien entendu, si, au point de vue mathématique, on peut partir de n'importe quelle répartition, il est bien clair cependant qu'on arrivera au résultat re-

cherché d'autant plus vite que le point de départ est plus proche du point d'arrivée, c'est-à-dire que les débits au départ sont plus proches des valeurs finales. Pour choisir les valeurs initiales, on usera donc de bon sens, et on utilisera éventuellement les résultats expérimentaux disponibles. Ceci vaut en particulier si l'étude a pour objet des modifications prévues à un réseau existant : on peut alors généralement prendre les débits existants comme répartition de départ.

Il faudra évidemment, en écrivant les valeurs initiales des débits, tenir compte de la règle des signes (voir par. 102).

22. Il y a lieu ensuite de choisir les  $b - n + 1$  mailles qui serviront au calcul. Dans ce choix, il y a plusieurs conditions à respecter :

a) chaque branchement du réseau doit intervenir au moins une fois dans l'ensemble des mailles ;

b) les  $(b - n + 1)$  mailles doivent être indépendantes les unes des autres. Aucune d'entre elles ne peut résulter de la combinaison de plusieurs autres mailles déjà choisies et juxtaposées de telle sorte qu'en supprimant les branchements communs parcourus deux fois en sens contraire, le contour subsistant forme la nouvelle maille ;

c) les branchements communs à plusieurs mailles doivent être aussi peu résistants que possible. Pour ces branchements, la dérivée  $dH/dQ$  doit être la plus faible possible en valeur absolue. Cette condition détermine la rapidité de la convergence des approximations successives.

Les  $(b - n + 1)$  mailles étant choisies en respectant les critères ci-dessus, il n'y a aucun inconvénient à ajouter des mailles supplémentaires (celles-ci ne seront évidemment plus indépendantes).

223. Les mailles étant tracées, on adoptera pour effectuer le tour de chacune d'elles un sens déterminé ( par exemple celui des aiguilles d'une montre). En parcourant la maille dans ce sens, on rencontrera les divers branchements dont elle est constituée, les uns dans le sens direct, les autres dans le sens inverse (voir par. 103).

Aux branchements dont le sens direct coïncide avec celui du parcours de la maille, on attribuera le signe  $+$ . Aux branchements dont le sens inverse coïncide avec celui du parcours, on donnera le signe  $-$ .

Un même branchement, appartenant à plusieurs mailles, pourra donc avoir suivant la maille considérée un signe positif ou négatif (ce « signe de branchement » est distinct du « signe du débit », voir par. 102).

224. Calculons, pour la répartition arbitraire des débits constituant le point de départ, la somme

des différences de pression  $H$  relatives aux branchements formant la première maille. Pour établir cette somme, nous calculerons successivement pour chacun des branchements l'expression

$$H = -K |Q| Q - LQ + V$$

et nous ferons la sommation des  $H$  en tenant compte de la règle des signes du par. 223 : les  $H$  gardent leur signe propre pour les branchements positifs et changent de signe pour les branchements négatifs. Nous obtiendrons en général :

$$\sum H = S \neq 0$$

225. Le procédé de calcul adopté consiste essentiellement à déterminer une correction  $\Delta Q$  applicable aux débits de tous les branchements constituant la maille. Nous superposons de la sorte à la répartition initiale un débit de correction circulant en circuit fermé, de sorte que la condition de continuité en chaque nœud reste respectée. Ce débit se combinera algébriquement avec les débits initiaux, pour donner une nouvelle valeur, plus proche du résultat.

226. Si nous appliquons au débit d'un branchement une correction  $\Delta Q$ , nous aurons pour ce branchement en première approximation :

$$\Delta H = \frac{dH}{dQ} \times \Delta Q = (-2K |Q| - L) \Delta Q$$

Si, après avoir fait la correction  $\Delta Q$  sur tous les branchements d'une maille, nous appliquons à cette maille la condition de circulation, nous devons obtenir :

$$\sum (H + \Delta H) = 0$$

$$\text{ou } \sum H + \sum \Delta H = 0$$

Or, nous avons  $\sum H = S$ . Si donc nous voulons satisfaire à l'équation de circulation, il nous faut choisir  $\Delta Q$  de telle façon que

$$S + \sum \Delta H = 0 \quad \text{ou} \quad \sum \Delta H = -S$$

$$\text{ou} \quad \sum (-2K |Q| - L) \Delta Q = -S$$

$$\text{ou} \quad \Delta Q \sum (-2K |Q| - L) = -S$$

$$\text{ou enfin} \quad \Delta Q = \frac{S}{\sum (2K |Q| + L)}$$

$$= \frac{\sum (-K |Q| Q - LQ + V)}{\sum (2K |Q| + L)}$$

227. Pour chaque maille, on calculera donc les expressions

$$\Sigma H = \Sigma (-K |Q| Q - LQ + V)$$

$$\text{et } -\Sigma \frac{dH}{dQ} = \Sigma (2K |Q| + L) = \Sigma DH$$

et le quotient correspondant  $\Delta Q$  donnant la correction à appliquer algébriquement aux débits des différents branchements de la maille. Cette correction sera appliquée avec son signe réel, tel qu'il résulte de la division, pour les branchements positifs (voir par. 223), et avec un signe inversé pour les branchements négatifs.

La correction étant effectuée sur une maille, on passe à la maille suivante et on y effectue les mêmes opérations.

On procède de la même façon pour toutes les mailles du réseau, c'est la première itération.

228. Il est cependant bien clair que, certains branchements étant communs à plusieurs mailles, la correction effectuée sur une de celles-ci déséquilibrera les autres. Il sera donc nécessaire de recommencer plusieurs fois l'opération sur l'ensemble du réseau (itérations successives) jusqu'à ce que les corrections effectuées sur les différentes mailles deviennent toutes inférieures à un minimum fixé d'avance.

On peut minimiser les interactions entre mailles et par conséquent accélérer la convergence du procédé en appliquant la règle c) du par. 222 : les branchements communs à plusieurs mailles seront choisis parmi ceux dont la résistance est la plus faible ( $2K |Q| + L$  minimum en valeur absolue).

Moyennant le respect de cette condition, le calcul décrit ci-dessus converge en général assez rapidement.

### 23. Exemple de calcul.

230. Pour illustrer l'exposé un peu abstrait du par. 22, reprenons l'exemple de la figure 7 qui comporte 6 branchements et 4 nœuds. Les débits indiqués en  $m^3/sec$  sur les branchements, et les pressions relatives indiquées en mm de colonne d'eau aux différents nœuds correspondent à un régime du ventilateur donnant 240 mm C.E. (situation existante). On projette d'augmenter la vitesse du ventilateur et de porter sa force aéromotrice à 546 mm C.E. On suppose que la force aéromotrice du ventilateur ne dépend pas du débit (caractéristique horizontale) et on néglige le tirage naturel, l'air comprimé, etc. On demande de déterminer les nou-

veaux débits dans les différents branchements, avec une précision de 0,1  $m^3/sec$ .

231. Les deux puits, reliés par l'atmosphère extérieure, sont considérés ici comme un seul branchement, puisque les débits qui y passent sont identiques. Dans ce branchement n° 1 se trouve inséré le ventilateur (de surface) de la mine, unique source aéromotrice du réseau.

Pour chaque branchement, on a adopté comme sens direct celui dans lequel circule l'air dans la situation existante (flèches sur les branchements). Les résistances des différents branchements se calculent facilement à partir des débits qui les traversent et des différences de pression entre leurs extrémités.

232. Pour résoudre le réseau, il nous faut tracer  $6 - 4 + 1 = 3$  mailles numérotées I, II, III. En parcourant les mailles II et III dans le sens indiqué par les flèches, on rencontre les branchements 2 et 5 respectivement dans le sens inverse. Ils seront donc pris avec le signe négatif lors du calcul de ces mailles. Un autre choix des mailles aurait été possible. On aurait par exemple pu choisir, au lieu de la maille III, une maille IIIbis empruntant les branchements 1 - 4 - 5. Nous reviendrons sur ce point.

233. Le tableau I reproduit les calculs de la première itération. La première colonne reprend les numéros des mailles (M), la deuxième ceux des branchements (B), avec le signe dont ils sont affectés dans chaque maille, le troisième colonne donne les valeurs de la résistance K en kilomurgues, et la quatrième reprend les valeurs du débit en  $m^3/sec$ , soit initiales, soit modifiées au cours du calcul.

On calcule d'abord pour les branchements de la première maille les expressions  $-K |Q| Q$  et  $2K |Q|$ . Pour faciliter les additions, la colonne  $-K |Q| Q$  est divisée en deux parties, les valeurs négatives sont inscrites à gauche et les positives à droite (les signes s'inversent pour les branchements dits « négatifs »). Les forces aéromotrices des ventilateurs s'inscrivent également dans cette colonne. La colonne  $2K |Q|$  ne contient que des termes positifs (valeurs absolues).

234. En fin de maille, on établit les soldes et les sommes des colonnes  $-K |Q| Q = \Sigma H$  et  $2K |Q| = \Sigma DH$  et on calcule la correction  $\Delta Q = \Sigma H : \Sigma DH$ .

On applique la correction  $\Delta Q$  aux différents débits Q des branchements de la maille, ce qui donne les valeurs indiquées dans la colonne Q' (correction de signe inversé pour les branchements négatifs).

TABLEAU I. — Calculs de la première itération.

M	B	K	Q	- K  Q  Q		2 K  Q	Q'	Q <sub>t</sub>
				-	+			
I	1+	0,005	100	50	346	1,0	113,2	(120)
	2+	0,040	50	100		4,0	63,2	(60)
	3+	0,025	60	90		3,0	73,2	(72)
$\Delta Q = \frac{+ 106}{8,0} = + 13,25 \cong 13,2$				$\frac{- 240 \quad + 346}{+ 106} = \Sigma H$		8,0		
						$= \Sigma DH$		
II	4+	0,012	50	30		1,2	53,0	(60)
	6+	0,700	10	70		14	13,0	(12)
	2-	0,040	63,2		160	5,06	60,2	(60)
$\Delta Q = \frac{+ 60}{20,26} = + 2,96 \cong 3,0$				$\frac{- 100 \quad + 160}{+ 60}$		20,26		
III	6+	0,700	13,0	118		18,2	9,9	(12)
	3+	0,025	73,2	134		3,66	70,1	(72)
	5-	0,100	40		160	8	43,1	(48)
$\Delta Q = \frac{- 92}{29,86} = - 3,1$				$\frac{- 252 \quad + 160}{- 92}$		29,86		
IIIbis	1+	0,005	113,2	64	346	1,13	121,7	(120)
	4+	0,012	53,0	34		1,27	61,5	(60)
	5+	0,100	40	160		8,00	48,5	(48)
$\Delta Q = \frac{+ 88}{10,4} = + 8,5$				$\frac{- 258 \quad + 346}{+ 88}$		10,40		

On procède ensuite de même avec les mailles II et III, en tenant compte, pour les valeurs de Q (4<sup>me</sup> colonne) des modifications apportées par le calcul des mailles précédentes.

Lorsque le calcul a été fait pour toutes les mailles, et que les corrections apportées aux différentes mailles ne sont pas toutes négligeables, on recommence toutes les opérations (itérations successives).

235. Dans la dernière colonne du tableau (Qf), nous avons indiqué les valeurs finales exactes. On voit que les écarts subsistant après la première itération sont encore importants.

A la partie inférieure du tableau, nous avons refait le calcul en supposant qu'au lieu de la maille III on ait choisi la maille IIIbis (branchements 1 - 4 - 5). Les résultats sont déjà beaucoup plus proches des valeurs exactes.

Cela tient à ce que, dans la première hypothèse, les mailles II et III avaient en commun le branchement 6 très résistant (K = 0,700 kilomurgues), tandis que, dans la deuxième, les branchements les plus résistants (6 et 5) n'appartiennent chacun qu'à une seule maille. Cet exemple illustre l'importance d'un choix adéquat des mailles.

236. C'est avec cette nouvelle maille qu'ont été calculées les itérations suivantes. Les valeurs des débits calculés à chaque itération sont consignées au tableau II, avec l'indication des corrections  $\Delta Q$  apportées à chaque maille. Pour illustrer la progression, les valeurs de départ, ainsi que les débits finaux, ont été reproduits dans la première et la dernière colonne respectivement.

237. L'exemple ci-dessus a été choisi intentionnellement très simple. Il pourrait d'ailleurs être résolu par d'autres méthodes. Le nombre d'itérations, et, bien entendu, le nombre d'opérations pour chaque itération, augmentent fortement avec la complexité du réseau. Un réseau de 15 mailles demande plusieurs jours de calculs et constitue pratiquement le maximum qu'on puisse envisager de traiter par calcul manuel.

Pour résoudre des cas plus complexes, il faudra recourir à une machine. Celle-ci devra :

a) pouvoir effectuer très rapidement le grand nombre d'opérations arithmétiques nécessaires ;

b) pouvoir enregistrer les nombreuses données du problème (débits initiaux, coefficients K, L, V, des différents branchements, structure du réseau) et y accéder rapidement ;

TABLEAU II. — Résultats des itérations successives.

Mailles Branchements		Situation initiale	1 <sup>ère</sup> itération	2 <sup>e</sup> itération	3 <sup>e</sup> itération	4 <sup>e</sup> itération	Valeurs exactes
I	Corrections		+ 13,2	— 0,7	— 0,4	— 0,2	
1+	Débits	100	113,2	121,0	120,1	119,9	120
2+		50	63,2	59,5	60,0	59,9	60
3+		60	73,2	72,5	72,1	71,9	72
II	Corrections		+ 3,0	— 0,9	— 0,1	0,0	
4+	Débits	50	53,0	60,6	60,0	60,0	60
6+		10	13,0	12,1	12,0	12,0	12
2-		50	60,2	60,4	60,1	59,9	60
IIIbis	Corrections		+ 8,5	— 0,5	0,0	+ 0,1	
1+	Débits	100	111,7	120,5	120,1	120,0	120
4+		50	61,5	60,1	60,0	60,1	60
5+		40	45,5	48,0	48,0	48,1	48

c) exécuter des consignes relativement complexes (passage d'un branchement au suivant, d'une maille à la suivante, d'une itération à la suivante) si possible automatiquement ;

d) permettre un contrôle de la précision atteinte.

Ces possibilités, qui dépassent le programme des calculatrices classiques les plus perfectionnées, se trouvent heureusement réunies dans les nouveaux ordinateurs électroniques, et en particulier dans l'Ordinateur 650 de l'I.B.M. dont nous décrivons schématiquement le fonctionnement au chapitre 3.

### 3. L'ORDINATEUR I.B.M. 650

#### 30. Définitions.

Alors qu'une calculatrice effectue des calculs répétitifs sur des données qui lui sont fournies au fur et à mesure par des cartes perforées, un ordinateur, ou « data processing machine » travaille sur des données qu'il consulte dans un ordre quelconque dans une mémoire à grande capacité. Les opérations à effectuer ne dépendent pas d'un tableau de connexions mais d'une série d'ordres, en nombre quelconque, enregistrés au préalable par la machine.

L'ordinateur I.B.M. 650 effectue ses calculs par voie électronique, ce qui lui permet d'exécuter en une seconde des centaines d'additions, soustractions, multiplications ou divisions. Il est capable d'enregistrer, de lire, et de comparer entre eux des nombres de 10 chiffres.

Toutes ces opérations sont vérifiées automatiquement par la machine elle-même de sorte qu'il est impossible qu'une erreur passe inaperçue, même en cas de défaillance d'un organe quelconque.

La machine se caractérise par le grand nombre de ses mémoires magnétiques et par la rapidité de

l'accès à ces mémoires, dans lesquelles elle enregistre non seulement les données et les résultats du calcul, mais de plus les instructions nécessaires pour toutes les opérations à effectuer. Chacune de ces instructions, après avoir provoqué une opération, aiguille automatiquement la machine vers l'instruction suivante : l'enchaînement de ces opérations constitue le programme.

Les informations représentant les données et les instructions sont fournies à la machine sous forme de cartes perforées, ou d'enregistrement magnétique sur disques ou bandes. Les résultats sont perforés dans des cartes, ou tabulés directement, ou enregistrés magnétiquement.

#### 31. Parties constitutives (fig. 8).

##### 310. Unité de lecture et de perforation.

L'ordinateur comporte plusieurs « unités » ou armoires, dont la première lit, grâce au procédé classique de touches électriques, les cartes perforées à 80 colonnes introduites dans son magasin (200 car-



Fig. 8.

tes par minute). La même machine sert à perforer les résultats dans un autre jeu de cartes à raison de 150 cartes par minute.

Un tableau de connexions permet le choix des zones à lire ou à perforer dans les cartes.

### 311. L'unité de puissance.

Une deuxième armoire contient les circuits d'alimentation en courant et en tension des différents éléments de l'ordinateur.

La consommation d'énergie est de l'ordre de 30 kVA fournis sous une tension régularisée de 220 V.

La même armoire contient les circuits transcodeurs permettant le passage du système décimal aux différents codes utilisés dans la machine (code biquinaire à 7 canaux, et code quinaire à 5 canaux).

Dans chacun de ces codes un chiffre est représenté par deux impulsions simultanées, ce qui permet un contrôle permanent de la fidélité de la transmission : une impulsion parasite ou manquante ne peut provoquer une fausse interprétation, mais sera immédiatement détectée comme une erreur.

### 312. Unité de calcul.

Le calculateur proprement dit effectue les opérations arithmétiques et logiques (tests, comparaisons...) au moyen d'un grand nombre de circuits électroniques (2600 doubles triodes couplées par capacité résistance) qui se réduisent cependant à quelques types standards.

L'unité de calcul comporte, en particulier, un compteur appelé accumulateur, qui contient normalement le nombre sur lequel on travaille ou le résultat de l'opération précédente.

Sur une face de l'unité de calcul se trouve le pupitre de commande de l'ensemble. Il permet l'introduction de nouvelles données, les modifications du programme et l'inscription sur un tableau lumineux du contenu d'une mémoire quelconque, ce qui facilite la vérification des opérations en cours.

### 313. Tambour magnétique (fig. 9).

Dans la partie inférieure de l'unité de calcul se trouve un cylindre de 10 cm de diamètre et 40 cm de longueur, recouvert d'un alliage de cobalt-nickel à haute perméabilité, qui tourne à la vitesse de 12.500 tours/minute.

L'enregistrement des données se fait par des têtes magnétiques constituées de bobines avec noyaux de fer doux, réparties autour du tambour.

L'envoi d'une impulsion de courant dans une bobine crée à la surface du tambour un dipôle magnétique N-S ou S-N qui subsiste par rémanence. La lecture se fait par les mêmes têtes dans lesquelles le passage des dipôles provoque un courant induit.

La surface extérieure du cylindre est divisée (suivant la génératrice) en 40 bandes et suivant la circonférence en 50 secteurs délimitant 2.000 cases qui constituent les 2.000 mémoires de la machine.

Les données enregistrées dans une mémoire y restent disponibles aussi longtemps que l'on n'enregistre rien d'autre.



Fig. 9.

Ces mémoires sont numérotées de 0000 à 1999. Ces numéros, ou adresses, permettent d'appeler la mémoire correspondante pour en lire le contenu ou y enregistrer un nombre. Chaque mémoire est sélectionnée statiquement (détermination de la bande) par le choix des têtes de lecture correspondantes, et dynamiquement (détermination du secteur) par le choix de l'instant de la lecture.

Chaque mémoire peut contenir un signe et un nombre de 10 chiffres. Chaque chiffre est représenté par la combinaison de 5 dipôles magnétiques positifs ou négatifs (N-S ou S-N).

Le temps de lecture d'un nombre de 10 chiffres est de 95 microsecondes.

Le temps de rotation du tambour est de 4800 microsecondes.

Le temps moyen d'accès à une mémoire est donc de 2400 microsecondes.

## 32. Schéma logique.

Un nombre quelconque, faisant partie des données du problème ou résultant d'un calcul, est enregistré dans une mémoire localisée par son adresse de 4 chiffres, que nous appellerons « adresse facteur ».

Une instruction, ou ordre d'opération, est aussi enregistrée dans une mémoire quelconque sous la forme d'un nombre de 10 chiffres, dont les deux premiers indiquent le genre d'opération à effectuer

(code opération), les quatre suivants, l'adresse facteur du nombre sur lequel cette opération doit porter, et les quatre derniers, l'adresse où se trouve enregistrée l'instruction suivante (adresse instruction).

L'instruction passe du tambour dans une mémoire spéciale (formée de tubes électroniques) ap-

pelée « registre programme » où la machine en analyse les différentes parties (fig. 10).

Le code opération agit directement sur l'unité de calcul, et choisit les circuits destinés à effectuer l'opération commandée (par exemple une addition).

La machine sélectionne ensuite sur le tambour la mémoire indiquée par l'adresse facteur et en envoie le contenu à l'unité de calcul qui effectue sur ce nombre l'opération commandée.

Celle-ci peut être une des quatre opérations arithmétiques fondamentales, ou un test logique (par exemple: un nombre est-il positif ou négatif?), ou le transfert d'un nombre d'une mémoire vers l'unité de calcul et vice-versa, ou encore un ordre de lecture ou de perforation d'une carte contenue dans le magasin.

Enfin, la machine sélectionne sur le tambour, grâce à « l'adresse instruction », la mémoire où elle trouvera l'ordre suivant à effectuer, et le cycle recommence.

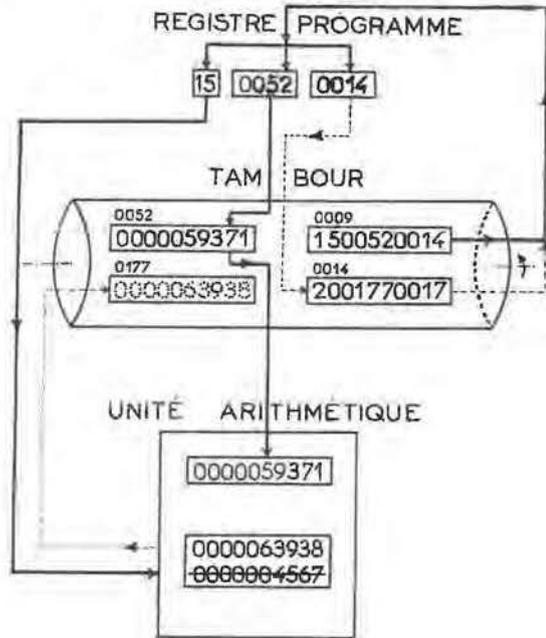


Fig. 10.

### 33. Rédaction des instructions (fig. 10).

Supposons qu'il s'agisse d'additionner deux nombres : A = 0000004567 enregistré dans une carte et B = 0000059371 résultant d'une opération précédente et se trouvant par exemple dans la mémoire 0052. La machine recevra les instructions ci-dessous :

Emplacement de l'instruction	Instruction	Nature opération	Effet
0001	70 0101 0004	lire une carte	A enregistré en 0101
0004	65 0101 0009	remise de l'accumulateur à zéro et addition	A dans l'accumulateur
0009	15 0052 0014	addition	A + B dans l'accumulateur
0014	20 0177 0017	transfert accumulateur	A + B → dans 0177
0017	71 0177 0021	perforation	A + B perforé dans une carte
0021	... ..	.....	.....

La donnée A lue dans une carte doit être enregistrée dans une mémoire 0101 (opération 70) avant d'être transmise au compteur-totalisateur de l'unité de calcul (accumulateur).

Celui-ci, remis à zéro pour effacer les opérations précédentes, reçoit le nombre A lu dans la mémoire 0101 (opération 65). Ensuite, le nombre B est transmis de la mémoire 0052 à l'accumulateur où il est additionné au contenu de celui-ci (opération 15).

Le résultat est transmis de l'accumulateur à la mémoire 0177 (opération 20) d'où il peut être perforé dans une carte sortie (opération 71).

Les instructions se suivent en chaîne, chacune aiguillant la machine vers la suivante. En particu-

lier, si les 4 derniers chiffres de la dernière instruction forment l'adresse de la première, le cycle recommencera et la machine additionnera le nombre B au nombre A lu dans une nouvelle carte. On aura donc réalisé un bouclage des instructions. Dans certains cas, la machine peut choisir entre deux instructions en fonction du résultat de certains tests (Un nombre est > ou < 0 ? ... etc).

La machine peut également modifier une instruction en effectuant sur elle des opérations arithmétiques, par exemple en ajoutant des constantes à l'adresse facteur ou à l'adresse instruction, ou en leur substituant de nouvelles adresses.

On obtient ainsi des schémas souples s'adaptant aux problèmes les plus complexes.

Lorsque les programmes comportent un grand nombre d'instructions, on établit d'abord un bloc diagramme ou organigramme (fig. 11). Ce graphique représente une synthèse logique des différentes étapes du calcul et fait apparaître les bouclages et aiguillages nécessaires.

#### 34. Codes symboliques.

Le maniement de centaines d'instructions écrites comme ci-dessus en langage machine (mots de 10 chiffres) est laborieux et présente des risques d'erreur. Des méthodes spéciales extrêmement ingénieuses ont été imaginées pour faciliter la tâche des programmeurs.

En particulier, pour le programme de calcul du problème de ventilation, nous avons fait usage du code PASO (Programme d'assemblage symbolique et optimisé).

On rédige le programme sous une forme littérale ; les codes opérations et les adresses du tambour sont représentés par des abréviations de trois ou cinq lettres rappelant mnémotechniquement leur contenu. Cette rédaction est plus parlante, et bien souvent on peut garder tels quels les symboles algébriques utilisés.

Le programme ainsi rédigé est perforé dans un jeu de cartes mécanographiques, puis introduit dans la machine. Celle-ci, grâce à une série standard d'instructions enregistrées préalablement (programme PASO) et jouant en quelque sorte le rôle d'un dictionnaire, traduit en code numérique les abréviations alphabétiques et perfore les instructions en langage machine, dans un nouveau jeu de cartes.

Lors de cette traduction, la machine choisit elle-même les adresses numériques à attribuer à chaque symbole littéral. Elle effectue ce choix de façon à assurer une accessibilité aussi rapide que possible aux données ou instructions à lire successivement (optimisation) : elle leur choisit à cet effet sur le tambour des emplacements qui passeront justement sous les têtes de lecture au moment où l'opération précédente s'achèvera.

Les nouvelles cartes, établies en langage machine, sont ensuite rechargées, avec les données, dans le magasin d'alimentation et le calcul s'effectue normalement.

Des programmes encore plus perfectionnés permettent de passer automatiquement du langage algébrique ordinaire (légèrement modifié) au langage machine, grâce à 3 traductions successives effectuées par la machine elle-même (FORTRAN).

#### 4. RESOLUTION, PAR L'ORDINATEUR, DU PROBLEME DE VENTILATION

##### 40. Chargement du tambour.

400. Le programme de calcul comprend 200 instructions environ, dont la plupart serviront un grand nombre de fois par suite des bouclages : ce sont par exemple toujours les mêmes instructions qui sont réutilisées pour le calcul de la perte de charge dans un branchement, ou celui de la correction dans une maille.

Ce programme, rédigé en code PASO, a été traduit en langage machine numérique lors d'un passage préliminaire, et a ensuite été chargé sur le tambour.

401. Les données (débits initiaux et résistances des branchements) ont été perforées dans des cartes portant, outre la valeur numérique de ces éléments, le numéro de l'adresse où on désirait les enregistrer.

C'est ainsi que, pour les débits, on a réservé les 300 premières mémoires (n° 0000 à 0299), pour les coefficients K les mémoires 0300 à 0599, pour les coefficients L les mémoires 0600 à 0699, et pour les coefficients V les mémoires 0700 à 0750. Ces données ont été classées toujours dans le même ordre de telle sorte que l'adresse du coefficient K relatif à un branchement déterminé soit égale à celle du débit Q dans le même branchement augmentée de 300. De même, l'adresse de L s'obtiendra en ajoutant 600 et celle de V en ajoutant 700 à celle de Q (on n'a prévu des termes en L et V que pour 100 et 50 branchements respectivement qui sont groupés en tête de la liste).

De plus, dans chacune des mémoires contenant les débits Q, on a réservé trois positions (chiffres) indiquant à la machine si la caractéristique du branchement correspondant contient oui ou non chacun des termes K, L, ou V.

402. Aux 750 mémoires contenant les données numériques, fait suite une liste des branchements groupés maille par maille dans l'ordre où le calcul doit les traiter. Cette liste indique le signe attribué à chaque branchement dans la maille correspondante, et l'adresse où se trouve enregistré le débit de ce branchement.

Elle comporte de plus des repères caractérisant la fin de chaque maille.

Comme la plupart des branchements sont communs à plusieurs mailles, la liste comporte forcément de nombreuses répétitions.

Dans le cas traité, avec 151 branchements et 63 mailles, la liste comptait 500 rubriques.

Si, en cours d'étude, on veut apporter des modifications à la structure du réseau (nouvelles communications, par exemple), on modifiera le tracé

de certaines mailles et on retouchera la liste (ce qui, avec notre programme, peut se faire facilement, sans pour cela refaire l'entièreté du parcours).

C'est en somme au moyen de cette liste que l'on introduit dans la machine la configuration topographique du réseau.

41. Organigramme.

410. Calcul de la différence de pression dans chaque branchement.

La machine part du premier terme de la liste commençant à la mémoire 0750. Elle va chercher la valeur du débit Q dans le branchement indiqué et effectue en même temps les tests qui lui indiquent quels termes interviennent dans l'expression H.

Selon le résultat de ces tests, elle calcule  $-KQ|Q|$ ,  $-LQ$  et V, ainsi que les expressions:

$$H = -KQ|Q| - LQ + V$$

et:  $DH = 2K|Q| + L$

qu'elle enregistre dans des mémoires particulières.

Elle cumule les valeurs H et DH avec celles des branchements rencontrés précédemment:

$$\Sigma H \pm H, \quad \Sigma DH \pm DH$$

et tient compte, au moyen de tests appropriés, du signe de chaque terme à additionner.

411. Correction dans chaque maille.

Ayant achevé le calcul d'un branchement et cumulé les résultats, la machine consulte la liste qui lui indique le branchement suivant à traiter.

Un test approprié (Fin de maille?) caractérise la fin de maille. Si ce test est positif, la machine calcule la correction  $\Delta Q = \Sigma H / \Sigma DH$ ; elle compare cette valeur à une limite supérieure (KTE =  $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ ) pour éviter des dépassements de capacité, et aux corrections précédentes pour juger de la précision atteinte.

Elle applique alors algébriquement la correction  $\Delta Q$  (limitée à un maximum de  $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ , si  $\Sigma H / \Sigma DH > 10 \text{ m}^3/\text{sec}$ ) à chaque branchement de la maille en tenant compte du signe de  $\Delta Q$ , de celui du branchement et de celui de Q.

Après avoir effectué les corrections sur toute la maille (test fin de maille), elle remet à zéro les sommes cumulées  $\Sigma H$  et  $\Sigma DH$ , et un bouclage du programme la ramène au début de la maille suivante, où le même processus recommence (calcul des pertes de charge et correction).

412. Contrôle de la précision.

Après avoir traité la dernière maille du réseau (test «Fin de réseau»), la machine perfore (PFO 1) une carte donnant la valeur maximum trouvée pour  $\Sigma H$  dans les différentes mailles, le numéro de la maille où ce déséquilibre a été constaté, ainsi que  $\Delta Q$  maximum et le numéro de la maille correspondante. Il est ainsi facile de suivre la convergence du calcul et de déceler les causes de perturbations éventuelles. Elle compare ensuite ces maxima à des limites fixées à l'avance (par exemple  $10 \text{ l/s}$  ou  $0,5 \text{ mm C.E.}$ ). Si les écarts trouvés sont supérieurs aux limites fixées, on recommence le calcul complet du réseau (itération).

413. Perforation des résultats.

Si les corrections sont inférieures aux valeurs imposées (test «Précision») le problème est considéré comme résolu.

La machine calcule alors une fois de plus les différences de pression dans chaque branchement, mais sans effectuer de corrections et ne passant qu'une fois par chaque branchement. Elle réutilise à cet effet la première boucle du programme, mais un aiguillage (une instruction modifiée par la machine elle-même) modifie le déroulement des opé-

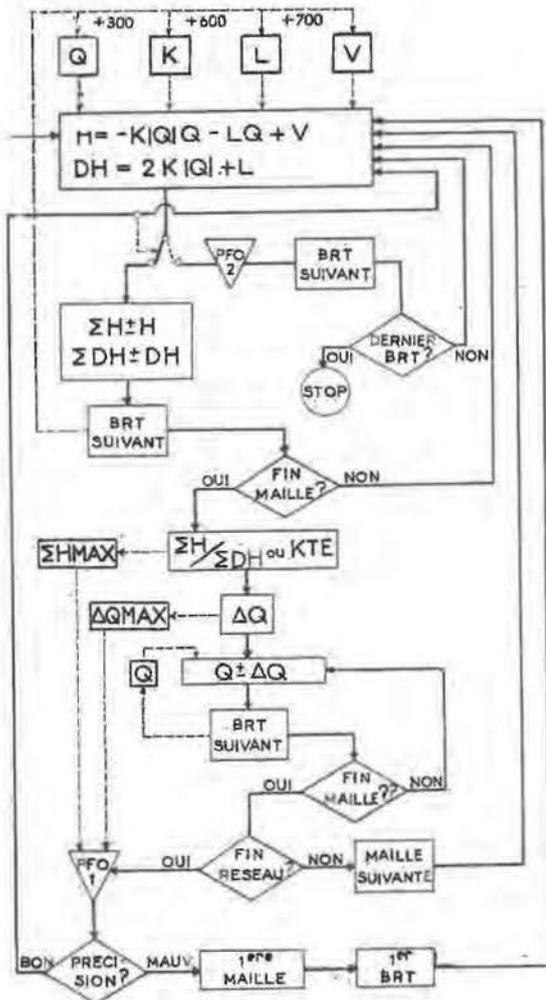


Fig. 11.

rations et oriente la machine vers la perforation des résultats (PFO 2).

Un test (dernier Bit ?) provoque l'arrêt de la machine, après le calcul et la perforation des résultats relatifs au dernier branchement.

#### 414. Tabulation.

Les cartes résultats (une par branchement) sont interprétées par une tabulatrice.

Celle-ci fournit un tableau de chiffres reproduisant le numéro de chaque branchement, la perte de charge dans ce branchement et le débit qui y passe.

Les cartes résultats peuvent d'ailleurs servir à enregistrer dans la machine les valeurs finales des débits, que l'on peut prendre comme valeurs initiales pour une étude ultérieure.

Il reste à reconstituer, à partir d'un point pris comme origine, les pressions régnant en chaque nœud, en additionnant de proche en proche les pertes de charge calculées par l'Ordinateur (ce travail est fait manuellement).

#### 42. Temps de résolution.

Le chargement du programme et des données, soit un millier de cartes, prend environ cinq minutes. On peut accélérer notablement ce temps en remplaçant ce jeu de cartes comportant un mot de 10 chiffres par carte, par un nouveau jeu où les mêmes indications seraient concentrées à raison de 7 mots par carte, le temps de lecture d'une carte étant indépendant du nombre de caractères à lire.

La transformation se fait au moyen de la 650 et d'un programme spécial.

La durée d'une itération est de 1 1/2 min environ pour un réseau de 151 branchements et 65 mailles (20 sec pour un réseau de 14 branchements et 6 mailles).

La résolution d'un problème demande à la machine une vingtaine de minutes de calculs. Cette durée dépend évidemment du nombre d'itérations nécessaires, et, par conséquent, de la précision exigée et du choix plus ou moins judicieux des mailles.

### 5. MISE EN CEUVRE PRATIQUE

#### 50. Schéma de la mine.

Nous avons commencé par dresser un schéma complet et clair de la mine, faisant ressortir les liaisons importantes au point de vue aérage et respectant dans la mesure du possible la topographie existante. Il nous a été possible de négliger certains branchements à très faible débit ou très faible résistance, ou d'en grouper d'autres qui sont raccordés en parallèle. Nous avons ainsi défini 89 nœuds et 151 branchements et avons identifié ces derniers

par une numérotation. Chaque numéro deviendra l'adresse où le débit correspondant sera enregistré sur le tambour de l'ordinateur. Il nous a fallu tracer  $151 - 89 + 1 = 63$  mailles.

Nous avons, lors du choix des branchements communs entre mailles, cherché à éliminer les branchements fortement résistants, ce qui nous a amenés à fermer de nombreuses mailles par les puits. Pour nous assurer de l'indépendance des mailles, nous avons tracé celles-ci dans un ordre déterminé, de telle sorte que chaque nouvelle maille comporte des branchements ne faisant pas partie des mailles précédemment tracées. De plus, nous avons veillé à ce que, pour chaque nouvelle maille, la partie du tracé commune avec l'ensemble des mailles précédemment choisies constitue un contour unique d'un seul tenant.

#### 51. Mesures.

510. Les débits ont été relevés à l'aide de l'anémomètre dans tous les branchements ou galeries, entrée et retour d'air. Pour chaque branchement, la section de mesure fut choisie, tenant compte de l'état de la galerie et du genre de soutènement (clavaux ou cadres), de façon à se mettre dans les meilleures conditions possibles.

Les résultats obtenus ont été compensés pour satisfaire l'équilibre en chaque nœud. Les augmentations de débits, dues par exemple à l'échappement d'air comprimé ou à la dilatation thermique, ont été localisées, sous forme d'injections à débit constant, en des nœuds bien déterminés. L'ensemble de ces injections provoque un déséquilibre de 15 m<sup>3</sup>/sec, soit environ 5 % du débit total, entre le puits d'entrée et le puits de retour d'air. Ce déséquilibre est compensé par une éjection globale de 15 m<sup>3</sup>/sec dans le nœud qui représente l'atmosphère extérieure.

511. Pour calculer les résistances, il est nécessaire de mesurer, soit la perte de charge dans chaque branchement, soit la pression absolue en chaque nœud. Nous avons combiné les deux méthodes. Les pressions absolues ont été mesurées en chaque nœud à l'aide d'un baromètre itinérant. Les fluctuations dans le temps furent corrigées par comparaison avec les relevés d'un baromètre fixe, placé soit au fond (magasin), soit en surface. D'autre part, les pressions ont été corrigées également en fonction des niveaux.

512. Cependant, les fluctuations générales ou locales de la pression étaient telles qu'il nous a fallu corriger ces chiffres par des mesures directes des différences de pression. Celles-ci ont été effectuées partout où c'était possible au moyen d'un tube en U et d'un flexible de 9 mm Ø extérieur, 3 mm Ø intérieur, pouvant atteindre une longueur

totale de 250 m. Cette méthode est utilisable aux portes et sondages de communication entre entrée et retour d'air et aux by-pass des ventilateurs, ainsi que dans les branchements où les pertes de charge sont particulièrement élevées.

Pour certains branchements, les pertes de charge étaient trop faibles pour être mesurables. Les résistances ont été calculées par comparaison avec les chiffres connus pour d'autres galeries de même type.

513. L'ensemble de ces mesures réparties sur un réseau de 120 km de développement nous a pris trois semaines. Le dépouillement et la compensation des résultats ont demandé une semaine supplémentaire. Une partie de ces mesures a été effectuée le dimanche, pour éviter les perturbations causées dans l'entrée d'air par le transport.

### 52. Calcul des données.

En possession du débit  $Q$  et de la perte de charge  $H$  dans chaque branchement, on peut calculer la résistance correspondante :

$$K = \frac{|H|}{Q^2} \text{ (cas où il n'y a pas de ventilateur).}$$

Pour les branchements comportant des ventilateurs, nous avons calculé, en partant des diagrammes fournis par le constructeur, des équations du second degré (équation 6, par. 142), coïncidant d'une manière satisfaisante avec la partie utile des caractéristiques des ventilateurs, ajustées en fonction du débit et de la dépression mesurés réellement.

Au coefficient  $K$  de l'équation du ventilateur, il ne faut pas oublier d'ajouter la résistance de la galerie en série avec le ventilateur. Cette résistance subsiste évidemment lors de la suppression éventuelle du ventilateur dans cette galerie.

### 53. Listing des données.

Toutes les données du problème étant ainsi chiffrées, il restait à établir l'ordre dans lequel la machine traiterait les différents branchements, en parcourant les mailles l'une après l'autre (chaque branchement étant traité, à chaque itération, un nombre de fois égal à celui des mailles auxquelles il appartient).

L'ensemble des cartes mécanographiques à perforer, à raison d'un nombre par carte, comportait donc :

- 1) 151 valeurs de débits  $Q$  (+ ou -) (en  $m^3/sec$  avec 3 décimales) ;
- 2) 151 valeurs de résistance  $K$  (en kilomurgues avec 6 décimales) ;
- 3) 11 valeurs de  $L$  (+ ou -) (en mm C.E. par  $m^3/sec$  avec 6 décimales) ;

4) 13 valeurs de  $V$  (en mm C.E. avec 3 décimales) ;

5) 520 numéros de branchement (+ ou -) (= adresses des débits).

A ce paquet s'ajoutèrent quelques dizaines de cartes définissant les variantes du problème proposé. Ces cartes, introduites dans la machine après le paquet principal, modifient certaines données et permettent la résolution immédiate du nouveau problème. L'ensemble, auquel s'ajoutent les 200 cartes du programme, représente un millier de cartes. Nous sommes donc encore loin d'avoir épuisé la capacité de la machine.

### 54. Variantes.

Nous avons étudié dix variantes du problème posé, correspondant à :

- différentes vitesses du ventilateur principal ;
- différents réglages des aubes directrices de ce ventilateur ;
- l'arrêt ou mise en marche de certains ventilateurs souterrains ;
- l'étranglement de certains circuits ;
- le percement d'un puits entre étages.

Pour passer de l'une à l'autre parmi les premières de ces variantes, il suffisait de modifier les valeurs numériques des coefficients  $K-L-V$  de certains branchements.

Pour les deux dernières, il y avait lieu d'ajouter ou supprimer certains branchements et de modifier le tracé des mailles, ce qui a été réalisé par l'introduction de quelques cartes correctives dans la liste des branchements.

### 55. Exécution du calcul.

Comme indiqué au par. 42, la machine a été occupée environ 1 1/2 minute par itération, soit 20 à 30 minutes par variante. A ce temps s'ajoute celui de la lecture des cartes (5 minutes) qui est commun pour l'exécution de plusieurs variantes calculées en série ; en effet, le calcul d'une variante peut utiliser comme point de départ les résultats de la précédente restés enregistrés sur le tambour de la machine. D'autre part, les cartes résultats peuvent être tabulées sur une machine indépendante pendant que l'ordinateur poursuit ses calculs sur la variante suivante.

Le traitement des dix variantes a été effectué au cours de deux journées pendant lesquelles nous avons disposé de la machine pendant 5 heures environ au total. Une séance antérieure avait été consacrée à la mise au point et à l'essai du programme.

### 56. Dépouillement.

En possession des tableaux de résultats, nous avons reporté sur les schémas de la mine les débits calculés (un schéma par variante). Les pertes de charge de chaque branchement, fournies par la machine, nous ont permis de calculer, de proche en proche, les pressions absolues en chacun des nœuds du réseau, et de vérifier l'équilibre en chaque nœud et sur le contour de chaque maille.

Ces schémas nous ont permis de prévoir d'une façon très complète la répartition des débits et des pressions dans toute la mine pour chaque hypothèse envisagée, et de choisir en connaissance de cause le régime le plus adéquat pour l'ensemble des ventilateurs.

## 6. CONCLUSIONS

### 60. Applicabilité de la méthode.

Si le travail de préparation du programme a été long, les résultats en restent acquis une fois pour toutes. Le programme mis au point est applicable à n'importe quel réseau de ventilation minière, et un problème pourrait être mis sur machine quelques heures après la réception des données numériques. Grâce à l'outil merveilleux qu'est l'ordinateur électronique, le volume des problèmes à traiter n'est plus limité par la complexité ou l'ampleur des calculs, mais uniquement par la possibilité de rassembler en temps utile l'ensemble des données expérimentales nécessaires.

Le domaine d'application de la méthode dépasse d'ailleurs largement celui de la ventilation minière. Elle est applicable telle quelle à des réseaux de distribution d'eau, d'air comprimé, de gaz et, moyennant des modifications, à des réseaux électriques ou de vapeur.

Insistons sur le fait que du travail préparatoire (mesures et relevés) dépend directement la qualité des résultats : les machines ne peuvent évidemment corriger les erreurs des mesures. Enfin, il paraît essentiel que les personnes qui ont effectué ces mesures et qui ont la connaissance physique du réseau à étudier participent à la mise des données sur machine et au dépouillement des résultats. Cette collaboration éliminera des malentendus, dissipera de faux problèmes et facilitera grandement l'interprétation des résultats.

### 61. Remerciements.

Le présent travail n'a été possible que grâce aux encouragements et aux directives que la Direction des Charbonnages de Winterslag n'a cessé de prodiguer aux auteurs de cet article à partir du moment où elle leur a posé le problème de la mise en service du nouveau ventilateur.

Ceux-ci tiennent à exprimer ici leur gratitude à la S.A. des Charbonnages de Winterslag.

à son Directeur-Gérant, Monsieur De Winter,  
à Monsieur Fierens, Ingénieur en Chef, Directeur des Travaux,  
à Monsieur Dubois, Ingénieur Principal.

Ils remercient également la Société Métallurgique d'Espérance-Longdoz et son service « Etudes et Méthodes », ainsi que la Direction et les Ingénieurs du Centre I.B.M. d'Ordinateurs Electroniques à Bruxelles, pour l'aide apportée à la programmation et à la mise sur machine du problème de ventilation.

## BIBLIOGRAPHIE

### Solutions graphiques.

- [ 1 ] F. LAURENT. — Etude graphique du fonctionnement de plusieurs ventilateurs souterrains en parallèle. Annales des Mines de Belgique, 1935, 2<sup>me</sup> livraison, p. 471-488.
- [ 2 ] R. LEFEVRE. — Note sur les différences de pression entre puits dans les mines aérées par ventilateurs souterrains. Annales des Mines de Belgique, 1941, 4<sup>me</sup> livraison.
- [ 3 ] E. DESSALES. — Note sur la marche en parallèle de ventilateurs souterrains et sur leur fonctionnement en série avec le ventilateur de surface. Revue Universelle des Mines, 1941, n° 5-6, p. 192-197.
- [ 4 ] R. LEFEVRE. — Considérations sur le couplage des ventilateurs de mine. Annales des Mines de Belgique, 1950, 6<sup>me</sup> livraison, p. 746-776.
- [ 5 ] E. DESSALES. — Aérage des Mines - Sens et grandeurs des courants. Revue de l'Industrie Minière, 1951, février, p. 4-15.
- [ 6 ] B. SAHN. — Verfahren zur Bestimmung von Wetterdrücken und Wettermengen in Grubenwetternetzen. Bergbau Rundschau, 1952, avril, p. 195-199.

### Modèles électriques.

- [ 7 ] W. MAAS. — An electrical analogue for mine ventilation and its application to ventilation planning. Geologie en Mijnbouw, 1950, avril, p. 118-123.
- [ 8 ] A. HOUBERECHTS. — L'activité de l'Institut d'Hygiène des Mines au cours de l'année 1954. Annales des Mines de Belgique, 1955, mai, p. 401.
- [ 9 ] A. HOUBERECHTS. — L'activité de l'Institut d'Hygiène des Mines au cours de l'année 1956. Annales des Mines de Belgique, 1957, mai, p. 394-396.
- [ 10 ] A. HOUBERECHTS. — L'activité de l'Institut d'Hygiène des Mines au cours de l'année 1957. Annales des Mines de Belgique, 1958, mai, p. 387-420.
- [ 11 ] J. PATIGNY. — L'étude de la ventilation minière par l'analogie électrique. Revue Universelle des Mines, 1958, novembre (voir aussi réf. 34).
- [ 12 ] R. HUEBNER. — Aufbau und Arbeitsweise des elektrischen Wettermodells Rheinlbe. Glückauf, 1955, 18 juin, p. 705-714.
- [ 13 ] E. FEITH. — Problèmes d'aérage et modèles analogiques électriques pour leur résolution. Revue de l'Industrie Minière, n° spécial (centenaire) 1 E, 1956, février, p. 350-357.
- [ 14 ] S. BATZEL et W. SCHMIDT. — Untersuchungen über die Wetterverzweigung unter Tage und ihre Vorausbestimmung mit Hilfe eines elektrischen Wettermodells. Glückauf, 1952, n° 19/20, p. 471-479.
- [ 15 ] W. SCHMIDT. — Durchführung der Wettertechnischen Planung mit Hilfe von elektrischen Modellen. Bergfreiheit, 1952, septembre, p. 1-10.

- [16] W. SCHMIDT. — Möglichkeiten und Grenzen der elektrischen Wettermodelle. Glückauf, 1957, n° 9/10, p. 225-245.
- [17] F. FLASCHE & G. SONNEMANN. — Erfahrungen beim Bau eines elektrischen Wettermodells. Bergbautechnik, 1955, avril, p. 183-190.
- [18] R. POHLE & D. KRAUSE. — Entwicklung und Einsatz eines elektrischen Wettermodells. Bergbautechnik, 1956, juillet, p. 371-383.
- [19] G.E. Mac ELROY. — A network analyzer for solving mine-ventilation distribution problems. Inform. Circ. Bur. Min., 1954, n° 7704.
- [20] D. SCOTT & F. HINSLEY. — The solution of ventilation network problems. Transactions of the Institution of Mining Engineers, 1952, mars, p. 348-371.
- [21] D. SCOTT. — Solving ventilation network problems by machine. Colliery Engineering, 1952, octobre, p. 410-413. Colliery Engineering, 1955, mai, p. 196-199.
- [22] D. SCOTT, R. HUDSON & F. HINSLEY. — A ventilation Calculator. The solution of network problems. Colliery Guardian, 1953, 30 avril, p. 553-556, 4 juin, p. 694-695. Transactions Inst. Min. Eng., 1953, mai, p. 623-637.
- [23] FREMIOT & CHAUMONT. — Appareil permettant la résolution des problèmes d'aérage. Docum. Techn. Charb. de France, 1951, n° 11, p. 21-27.

#### Calcul par approximations successives.

- [24] H. CROSS. — Analysis of flow on Networks of conduits or conductors. Bulletin 286, Engineering Experiment Station, University of Illinois, 1936.
- [25] D. SCOTT & F. HINSLEY. — The solution of ventilation network problems. Transactions Inst. Min. Eng., 1952, mars, p. 347-371.
- [26] D. SCOTT & F. HINSLEY. — Ventilation Network theory. Colliery Engineering, 1951, février, p. 67-71, avril, p. 159-166, juin, p. 229-235, décembre, p. 497-500 - 1952, avril, p. 137-143.
- [27] J.R. COWAN & N.H.F. YOUNG. — The reorganisation of the ventilation at Auchengleish Colliery. Transactions of the Inst. Min. Eng., 1952, juillet, p. 698-716.
- [28] A. BARENBRUG. — Ventilation network calculation. Min. Vent. Soc. South-Africa, 1953, avril, p. 1-20, juillet, p. 6-27.
- [29] Y. HIRAMATSU. — Ermittlung der Stärke von Wetterströmen in Grubenwetternetzen nach Formeln für den elektrischen Strom. Glückauf, 1953, 11 avril, p. 355-359.
- [30] L. VAN DEN DUNGEN. — Calcul des réseaux de ventilation. Annales des Mines de Belgique, 1958, juillet, p. 689-696.

#### Machines arithmétiques.

- [31] B. SAHN. — Rechenanlagen zur Lösung von Bergbauproblemen, ihre mathematische Grundlagen und Bauelemente. Bergbau Archiv, 1957, n° 1, p. 17-35.
- [32] I.B.M. — Documentation non publiée sur l'Ordinateur Electronique 650.
- [33] I.G. DE BECKER. — Logisch Rekenmateriaal en zijn Toepassingen (I.B.M.). Technisch Wetenschappelijk Tijdschrift, 1957, n° 2, p. 54-62.
- [34] O. de CROMBRUGGHE et J. PATIGNY. — Ventilation Minière. Procédés récents pour l'étude des réseaux maillés. Bulletin Technique U.I.Lv., 1958, n° 3, p. 145-162.
- [35] H. PILOTY. — Was leisten und wie arbeiten elektronische Rechenanlagen ? - Glückauf, 1958, 2 août, p. 1023-1036.
- [36] H. KAUFMANN. — Der Siemens Digital-Rechner 2002. Siemens Zeitschrift, 1958, mars, p. 142-147.
- [37] G. VAN MECHELEN. — De automatische digitale Rekenmachines en hun toepassingsmogelijkheden. Technisch Wetenschappelijk Tijdschrift, 1956, n° 2, p. 30-44, 1957, n° 7 p. 185-192.
- [38] H. WILLEMS. — De UNIVAC-Rekensystemen (Remington-Rand). Technisch Wetenschappelijk Tijdschrift, 1957, n° 2, p. 63-66.