

**ORGANE PERMANENT
POUR LA SECURITE DANS LES MINES DE HOUILLE**

Groupe d'experts "Aérage"

STABILISATION DE L'AERAGE EN CAS D'INCENDIE

Exposé documentaire sur la théorie du Professeur Budryk

**Professeur d'exploitation des mines,
Recteur de l'Académie des sciences de Cracovie**



Luxembourg, septembre 1967

**ORGANE PERMANENT
POUR LA SECURITE DANS LES MINES DE HOUILLE**

Groupe d'experts "Aérage"

STABILISATION DE L'AERAGE EN CAS D'INCENDIE

Exposé documentaire sur la théorie du Professeur Budryk

**Professeur d'exploitation des mines,
Recteur de l'Académie des sciences de Cracovie**



Luxembourg, septembre 1967

SOMMAIRE DE L'EXPOSE

I - Contenu de la théorie de Budryk

La théorie du Professeur Budryk a pour objet d'aboutir à la formulation de règles pratiques simples, dans le cas d'aérage montant, pour éviter les inversions catastrophiques de l'aérage que peuvent provoquer les fumées d'un incendie, par "effet de cheminée" dans les branches inclinées ou verticales d'un réseau.

II - Représentation schématique des réseaux d'aérage

Parmi les différents types de représentation schématique indispensables pour l'étude d'un réseau d'aérage, un "schéma original" imaginé par Budryk est bien adapté à l'analyse des actions combinées de plusieurs sources aéromotrices : ventilateurs ou incendies.

III - Stabilité des courants d'aérage

Un réseau d'aérage comporte des branches stables et des branches instables.

On analyse dans ce chapitre l'instabilité des courants d'aérage dans son ensemble et on précise les cas auxquels s'applique particulièrement la théorie de Budryk.

IV - Théorie de la stabilisation de l'aérage en cas d'incendie

Etablie pour le cas courant où l'effet aéromoteur, créé par un incendie dans une branche en aérage montant, est concordant avec l'action de la ventilation principale, la théorie aboutit à une formule fondamentale simple qui exprime les conditions à respecter pour garantir la stabilité du sens de l'aérage dans une branche menacée d'inversion.

V - Pratique de la stabilisation de l'aérage en cas d'incendie

Partant de la formule fondamentale, on met en lumière les différentes interventions à faire sur les résistances du réseau et sur les sources aéromotrices pour éviter les inversions d'aérage ou en limiter les conséquences.

VI - Application de la théorie de Budryk dans les mines polonaises

Exposé rédigé d'après les renseignements recueillis sur place par le groupe d'experts lors de son voyage d'étude en Pologne.

VII - Conclusions

ANNEXES

I - Mines de houille de Roche-la-Molière - Incendie du puits Combes (48 morts)

Exposé d'une catastrophe due à une inversion d'aérage ayant pour origine un incendie de soutènement.

II - Catastrophe de Dukla (108 morts)

Extrait sommaire de l'analyse d'une catastrophe due à l'envahissement de plusieurs quartiers par les fumées d'un incendie provenant d'un incendie localisé.

III - Influence de la température des fumées sur l'effet thermodynamique global d'un incendie +)

Dans cette annexe on discute l'effet de freinage et l'effet de cheminée qui proviennent de l'action thermodynamique d'un incendie. La résultante de ces 2 effets passe par un maximum pour une température limitée. On en déduit une expression mathématique pour l'évaluation du risque d'inversion dans un cas courant simple.

IV - Types divers de représentations schématiques du réseau d'aérage d'une mine

Ils permettent de comparer entre eux, et notamment avec le schéma imaginé par Budryk, les différents modes de représentation schématique.

V - Méthode pratique pour l'établissement d'un schéma canonique

VI - Exemple d'instabilité de premier ordre

C'est l'exemple d'une inversion d'aérage dans des diagonales, survenue au cours d'une lutte contre un incendie.

VII - Exemple d'étude de stabilité

Il met en lumière d'une part les risques d'inversion existant dans un réseau d'aérage classique et d'autre part l'intérêt de représentations telles que le schéma imaginé par Budryk, pour les analyser.

VIII - Expression analytique de la formule de Budryk pour un réseau ramifié

IX - Généralisation de la formule de Budryk

Exposé aboutissant à valider la formule de Budryk pour les réseaux maillés et précisant la signification physique des différents termes.

+)Sera publié ultérieurement

Au cours de la réunion commune des deux groupes de travail "Incendies et Feux de Mine" et "Sauvetage" du 17 mars 1960, M. STENUIT, délégué gouvernemental belge, a fait un exposé succinct de la théorie du Professeur BUDRYK, en application depuis plus de 30 ans dans les travaux souterrains des mines polonaises dans le domaine de la lutte contre les incendies.

Cette théorie explique et justifie l'ensemble des mesures prises en Pologne (1), à titre préventif, ou au moment même de la lutte contre un incendie, pour éviter en particulier des inversions d'aérage dont la conséquence est non seulement d'entraver, sinon d'empêcher, la lutte contre l'incendie, mais aussi de menacer les équipes engagées dans la lutte et le personnel des chantiers voisins plus ou moins éloignés.

La théorie du Professeur BUDRYK conduisant à des mesures inhabituelles dans les pays de la Communauté européenne et surtout paraissant inadaptées aux mines grisouteuses, il a été décidé de la faire examiner très attentivement par un groupe d'étude avant d'envisager les suites à lui donner.

Le groupe d'étude, composé de :

- M. BOTH : Dipl. Ingénieur, chef de la section de lutte contre les feux - Station Centrale de Sauvetage d'Essen-Kray
- M. CHAMPAGNAC : Ingénieur en chef aux Houillères du Bassin de Lorraine
- M. CRETIN : Ingénieur principal aux Houillères de Lorraine
- M. FONTAINE : Ingénieur attaché à l'Organe Permanent pour la Sécurité dans les mines de houille
- M. le Dr. Ing. GREUER : Station de recherches d'aérage du Steinkohlenbergbauverein d'Essen
- M. LECLERCQ : Ingénieur, conseiller à la Direction Générale Charbon de la C.E.C.A.
- M. le Dr. MAAS : Chef du groupe Aérage et Sécurité du Centre de recherche des Mines d'Etat des Pays-Bas
Professeur extraordinaire à l'Université de Delft

1) Dont certaines sont rendues obligatoires par les Règlements officiels

- M. PATIGNY : Ingénieur divisionnaire à l'Institut
d'hygiène des Mines de Hasselt
Chargé de cours extraordinaire à l'Université
de Louvain
- M. le Dr. SCHMIDT : Physicien de la station d'essai de la
"Westfälische Berggewerkschaftskasse"
Bochum
- M. SIMODE : Ingénieur Principal à la Direction des Etudes
et Travaux Neufs des Houillères du Bassin de
Lorraine
- M. STENUIT : Directeur Divisionnaire à la Direction Générale
des Mines - Bruxelles

a étudié très à fond la théorie de Budryk d'après les documents
fournis par M. Stenuit au cours de nombreuses séances de
travail en commun.

Après une entrevue avec le Professeur KNOTHE, professeur
d'Aérologie minière à l'Académie des Sciences de Cracovie
à l'occasion d'un de ses passages en Europe occidentale et
un voyage d'étude en Haute-Silésie pour préciser sur place,
avec les théoriciens et les praticiens les conditions réelles
de l'application de la théorie de Budryk dans les mines
polonaises, le groupe d'étude a conclu à l'intérêt incontes-
table que présente l'ensemble de cette théorie pour les ex-
ploitants de la Communauté européenne.

C'est dans le but de leur information et sans pré-
juger des suites qui pourront leur être données que le
groupe d'étude présente ci-après les résultats de ses
travaux.

CHAPITRE I

CONTENU DE LA THEORIE DE BUDRYK

Un incendie de mine, attisé par un courant d'air, peut prendre rapidement une violence extrême pour peu qu'il survienne dans une galerie au charbon ou en présence de soutènement ou de matériaux combustibles.

La quantité de chaleur énorme dégagée par l'incendie peut selon la disposition des lieux, en particulier l'inclinaison des galeries parcourues par les fumées chaudes, provoquer par "effet de cheminée" (1) des perturbations considérables dans l'aérage.

Il en résulte une modification du régime des débits et des pressions qui peut aller jusqu'à l'arrêt et même l'inversion de l'aérage dans des galeries proches, et parfois lointaines, du lieu du sinistre. (2)

Ces perturbations dans l'aérage des chantiers et travaux créent un risque grave, aussi bien pour le personnel qui occupe la mine au moment du sinistre que pour les équipes engagées dans la lutte contre l'incendie.

C'est ainsi que l'on relève, dans l'histoire des mines, un certain nombre de cas ayant dégénéré en catastrophes, notamment à la mine de Roche-la-Molière, dans le Bassin de la Loire (France) le 30 juin 1928, où il y eut 48 morts (voir Annexe I) et à la mine Dukla (Ostrau Karwina) où il y eut 108 morts le 7 juillet 1961 (voir annexe II).

Les cas d'incendie causant des perturbations dans l'aérage étaient particulièrement nombreux au début du siècle en Pologne, où l'on exploitait des veines puissantes et à feux en mines non ou faiblement grisouteuses, donc aérées assez faiblement.

C'est cette circonstance qui explique que les Polonais aient eu à se pencher plus particulièrement sur ce problème, et qui a conduit Budryk à mener à bien une étude théorique

(1) On reviendra plus en détail, au chapitre IV, sur cet effet de cheminée et sur les autres perturbations pouvant résulter d'un incendie.

(2) En cas de l'aérage descendant l'arrêt et l'inversion de l'aérage sont également possibles dans la branche en feu elle-même. La théorie de Budryk ne concerne toutefois pas les incendies de mine dans les galeries aérées descendantes.

du phénomène qui aboutit à des règles pratiques assez simples pour éviter des inversions d'aérage lorsqu'un incendie survient en aérage ascendant.

La base scientifique de la théorie de Budryk est évidemment la thermodynamique; mais l'"effet de cheminée", quelque banal qu'il soit, est un phénomène complexe sur lequel on ne possède, en fait, aucune donnée expérimentale précise dans le domaine des relativement hautes températures (1) qui nous intéresse : aussi, les Polonais se contentent-ils, dans la pratique, de conclusions qualitatives qui sont déjà fort importantes, comme on le verra.

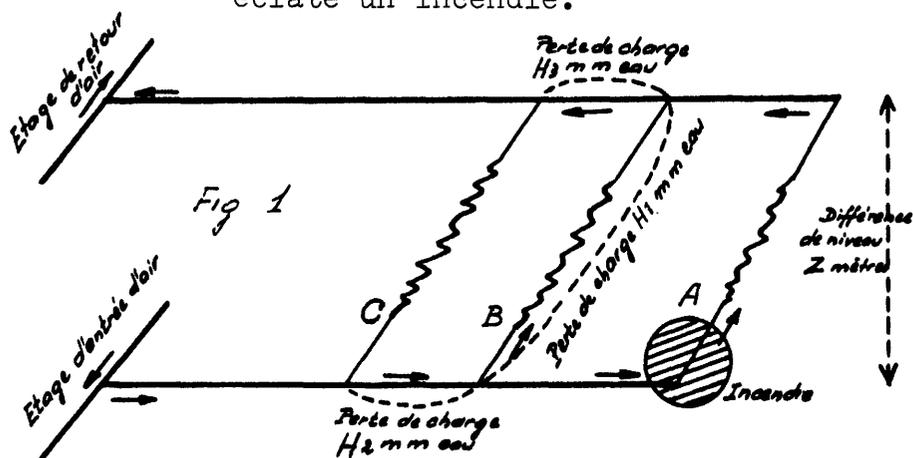
Mais les experts en aérage du groupe d'étude ont démontré par une étude purement théorique (voir Annexe III) que, en raison de l'influence de la température sur l'écoulement des fumées, l'effet aéromoteur des fumées d'incendie devait passer par un maximum pour une température moyenne de ces fumées généralement dépassée dans les cas réels.

Cette conclusion, bien qu'elle n'ait pas encore reçu la sanction d'une vérification expérimentale, confère à la théorie de Budryk une portée pratique considérable puisqu'elle établit que l'effet aéromoteur d'un incendie n'est pas illimité et que, par conséquent, ses conséquences maximales sont en tout état de cause limitées. De plus, elle permet de les calculer.

1) D'après le document n° 5688/62 la température des fumées d'un incendie dépasse 1000° au niveau du foyer lorsque celui-ci a embrasé toute la galerie. La température des fumées décroît ensuite d'autant moins vite que l'incendie dure plus longtemps et que la vitesse de l'aérage est plus grande.

Dans le livre "Technologie du bois et des matériaux en bois" (Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe) de Franz Kollmann, Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 2ème édition, on trouve à la page 245 un tableau sur les températures de combustion des bois en fonction de l'humidité des bois. Dans ce tableau on peut voir par exemple que la température de combustion du bois avec 30 % d'humidité, rapporté au poids naturel, s'élève à 1040° C.

On reviendra par la suite sur ce point, mais indiquons seulement pour le moment, à titre d'exemple, pour montrer la portée pratique possible de l'application chiffrée de la théorie de Budryk, la formule approximative, mais simple, que l'on peut établir pour caractériser le risque d'inversion d'aérage qui existe dans un quartier de la mine, s'il y éclate un incendie.



Soit (fig.1) 3 circuits d'aérage (chantiers) disposés "en parallèle".

Si un incendie prend naissance au pied du chantier A en aérage ascendant

- il y a risque d'inversion d'aérage dans le circuit B si :

$$\underline{\underline{3 H_1 < Z}}$$

- il y a risque d'inversion d'aérage dans les circuits B et C si :

$$\underline{\underline{3 (H_1 + \frac{H_2 + H_3}{2}) < Z}}$$

(voir annexe III)

Cette formule montre tout de suite que le risque d'inversion d'aérage est lié :

- à la dénivellation qui conditionne l'effet aéromoteur de l'incendie, et
- à la perte de charge dans les quartiers intéressés, laquelle est évidemment fonction de la puissance aéromotrice sous laquelle fonctionne la ventilation principale et de la configuration du réseau.

Il est donc nécessaire de connaître non seulement la dépression fournie par les ventilateurs principaux dans leurs conditions normales de marche, mais aussi les courbes caractéristiques de ces ventilateurs qui permettent de prévoir leurs conditions de marche dans des circonstances anormales.

Mais la répartition des pertes de charge dans la mine dépend aussi de la structure du réseau, souvent fort compliqué, c'est pourquoi un des premiers soucis de Budryk a été d'étudier une représentation schématique des réseaux d'aérage qui permette à la fois de raisonner qualitativement sur leur fonctionnement et de représenter leurs qualités et défauts au point de vue de la stabilité des courants d'aérage.

Nous allons voir, au chapitre suivant, ce que sont le schéma d'aérage de Budryk et le schéma dérivé, couramment utilisé par les Polonais sous le nom de "schéma canonique".

CHAPITRE II

REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES RESEAUX D'AERAGE

Les galeries des mines anciennes en gisement tourmenté, ou des sièges de concentration de plusieurs fosses autrefois autonomes forment généralement un réseau très complexe (1), que les plans topographiques classiques ne réussissent plus à représenter d'une façon suffisamment claire : à plus forte raison ces plans sont-ils tout à fait insuffisants lorsqu'il s'agit d'étudier non seulement l'aérage de ces mines, mais les perturbations possibles que peut y apporter un événement accidentel important comme l'apparition d'un incendie de quelque violence, ou même simplement la défaillance de l'un des ventilateurs principaux lorsqu'il y en a plusieurs, ou éventuellement d'un ventilateur auxiliaire.

Des représentations améliorées de l'ensemble de l'édifice minier sont constituées par des projections perspectives (2) (isométriques, cavalières ou autres), au besoin légèrement déformées lorsque c'est nécessaire pour la clarté de la représentation.

Ces perspectives, généralement rehaussées de couleurs pour distinguer les différents étages, les chantiers, etc..... sont maintenant couramment utilisées dans tous les pays, et notamment en Pologne.

Une réalisation intéressante utilisée aux Pays-Bas est un modèle tridimensionnel où les différentes galeries sont figurées par des fils métalliques, et où les fonctions des diverses galeries sont distinguées par des couleurs (entrées d'air en rouge, retours en bleu et tailles en jaune). L'échelle des hauteurs est généralement agrandie par rapport à l'échelle des longueurs et largeurs.

Mais aucune de ces représentations, si parlantes soient-elles, ne permet de saisir dans sa structure le réseau d'aérage proprement dit, dès qu'il présente une certaine complication. On reviendra sur ce point.

1) Voir Annexe IV plan n° 1

2) Voir Annexe IV plan n° 2

Pour faire le montage d'un réseau d'aérage sur le simulateur électrique, on utilise couramment une représentation schématique inspirée de celle des réseaux ou montages électriques, qui stylise le réseau et le dégage complètement de ses contingences dimensionnelles (1); ce n'est toutefois pas ce genre de représentation qui fut choisie par Budryk pour ses études.

La représentation schématique imaginée par Budryk est initialement une représentation fermée qui matérialise le fait que tout circuit d'aérage se referme par l'atmosphère, celle-ci constituant un conduit de résistance nulle (parce que de section infinie) entre la sortie du ventilateur (ou du puits de retour d'air) et l'orifice du puits d'entrée d'air. C'est donc essentiellement une représentation qui permet de raisonner sur un réseau d'aérage comme sur un circuit fermé.

Cette représentation des réseaux d'aérage se trouve, de ce fait, particulièrement adaptée au problème posé, qui consiste précisément à étudier les résultats de l'action conjuguée de deux sources aéromotrices (ventilateur et fumée d'incendie) dont l'une (l'incendie) est située à l'intérieur du réseau d'aérage et l'autre (le ventilateur principal) paraît être à l'extérieur ou tout au moins à sa limite, alors qu'en fait ces sources agissent tout à fait symétriquement sur un circuit effectivement fermé.

Dans le domaine de la représentation purement schématique, où l'on est délivré de toute contrainte "géométrique", il y a évidemment une infinité de façons de représenter un réseau donné : c'est précisément ce qui nous permettra de mettre en lumière telle ou telle propriété du réseau étudié.

Soit, par exemple, le réseau d'aérage du puits Combes des Mines de Roche-la-Molière, siège d'une inversion d'aérage à la suite d'un incendie le 30 juin 1928 (voir annexe I), rappelé sur la figure 1 ci-après. Une première représentation possible, la plus générale, est celle de la figure 2 où tout le quartier Ouest et la couche Chana sont représentés globalement. Ce schéma montre bien la texture maillée (2) du réseau qui n'apparaît pas du tout sur le plan usuel de la fig. 1. Le numérotage des "noeuds" est évidemment absolument indispensable pour le repérage des galeries.

1) Voir Annexe IV plan n°3

2) La définition exacte du réseau maillé est donnée au chapitre III qui suit.

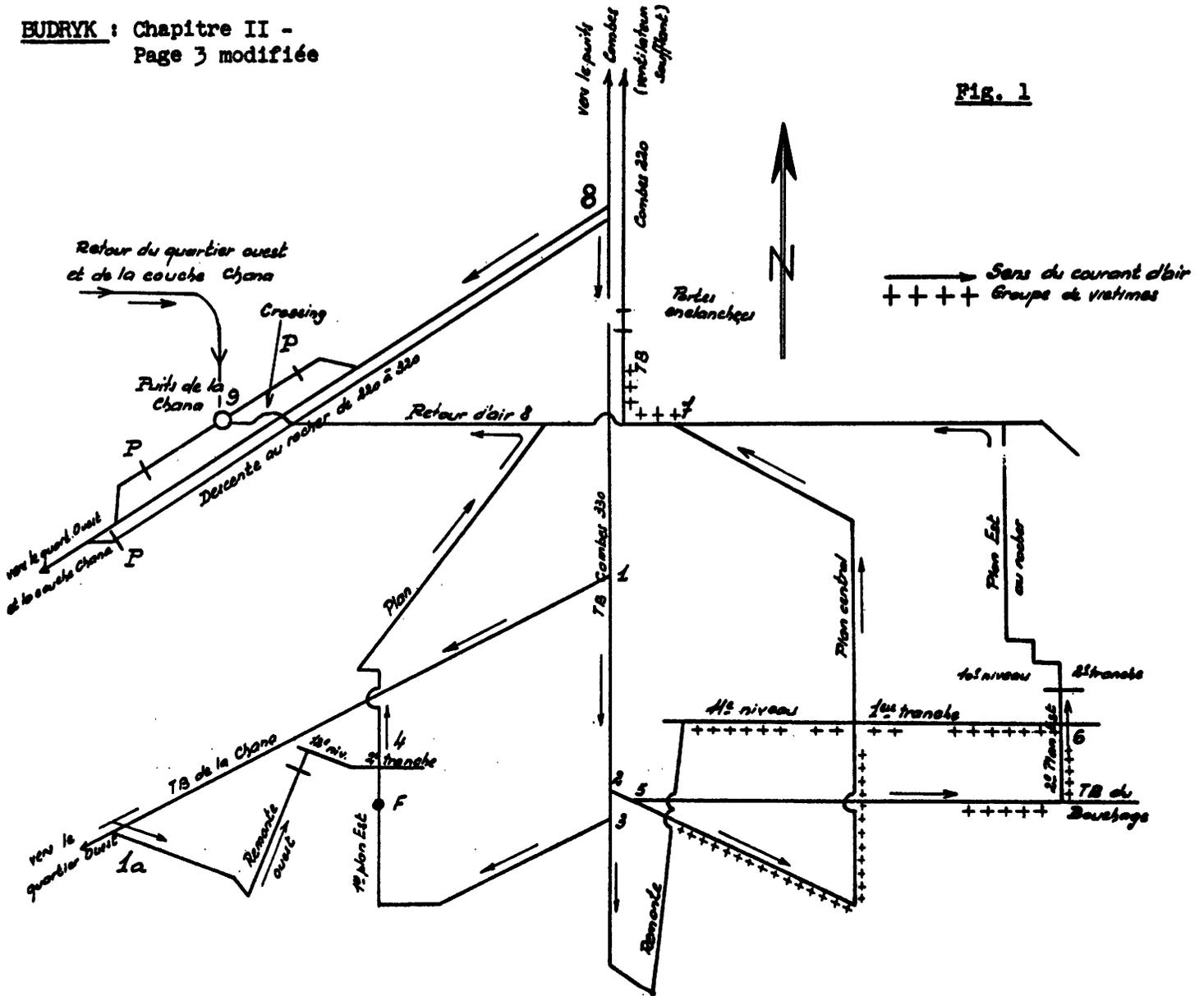


Fig. 1

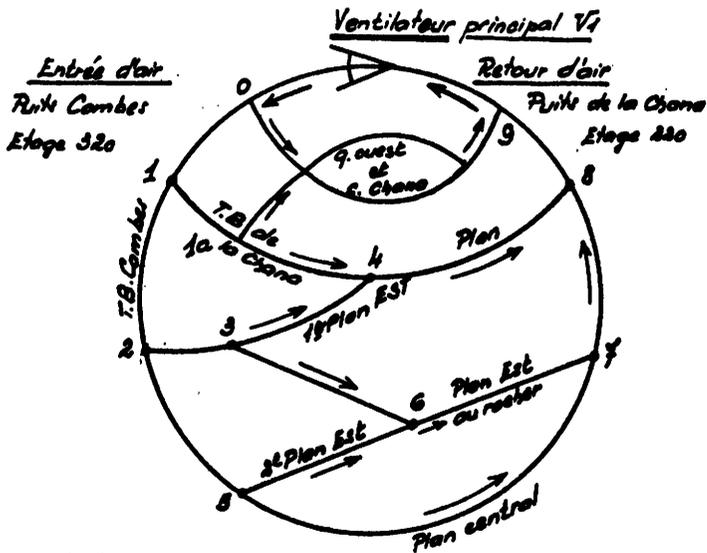


Fig. 2

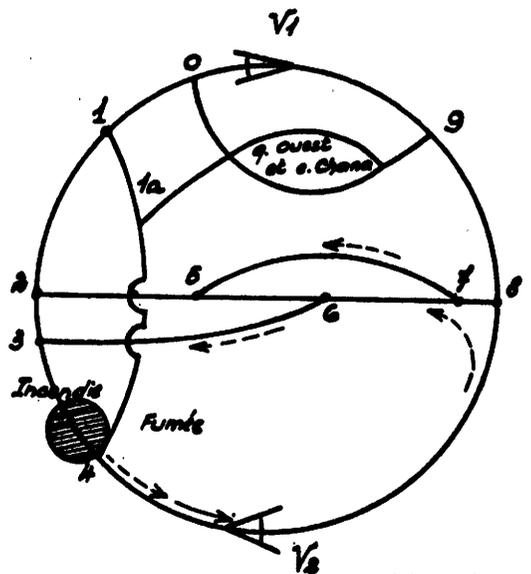


Fig. 3

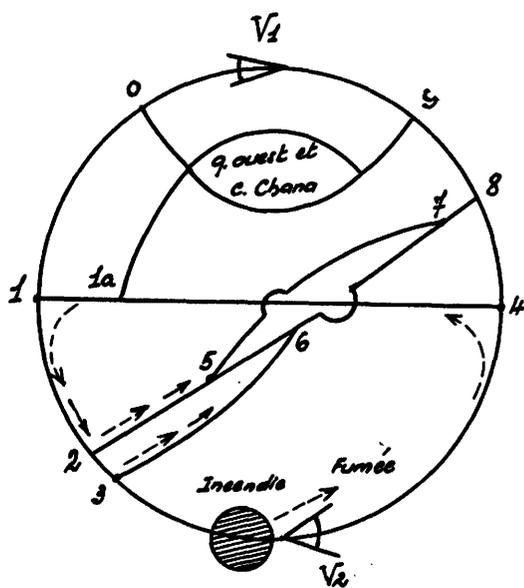


Fig. 4

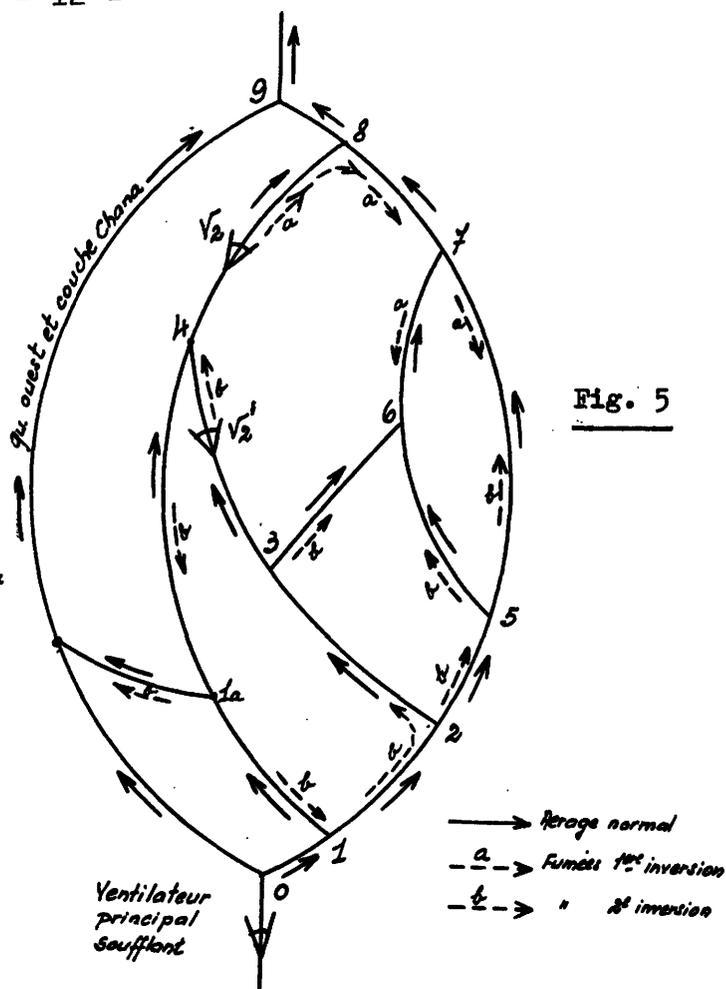


Fig. 5

Mais, ce qui nous intéresse, ce sont les conséquences qu'a eues l'incendie qui a pris naissance dans le 1er plan Est c'est-à-dire dans la branche 3-4.

Il semble bien, d'après le récit de la catastrophe, que l'effet de l'incendie (1) se soit d'abord manifesté en amont du point 4 dans la branche 4-8 puis par suite du développement de l'incendie vers le bas, se soit ensuite manifesté en aval du point 4, dans la branche 3-4.

Le schéma Budryk, selon figure 2, ne permet pas de se rendre compte de l'effet d'une source aéromotrice (gaz d'incendie) placée dans l'une de ces branches : mais d'autres schémas Budryk, ceux des fig. 3 et 4, qui sont d'autres représentations du même réseau d'aérage, mettant clairement face à face les deux sources aéromotrices en présence, le permettront.

1) On reviendra plus loin, de façon plus précise, sur la façon suivant laquelle se manifeste l'effet aéromoteur d'un incendie.

L'étude de ces schémas qui est précisément l'objet de la théorie de Budryk, sera reprise en détail dans les chapitres suivants.

On voit combien peuvent être différentes les fig. 2, 3 et 4, ces dernières étant seules caractéristiques de l'action du couple $V_1 - V_2$. Il est apparu alors que la disposition "fermée" du schéma fig. 2 n'apportait rien de nouveau lorsqu'il n'y a qu'une seule source aéromotrice et qu'il était beaucoup plus commode de l'établir en schéma "ouvert" où l'entrée d'air est traditionnellement en bas et la sortie d'air en haut. La fig. 5 reproduit ce schéma.

On remarquera que ces schémas "ouverts" ne sont pas autre chose que des schémas "type électrique" où les conducteurs ont conservé l'allure courbe héritée du schéma fermé.

Ce sont ces schémas "ouverts" qui sont non seulement traditionnels, mais même réglementaires dans toutes les mines polonaises, sous la dénomination de "schémas canoniques".

Il n'y a pas de règles précises pour établir ces schémas : leur seul intérêt est de fournir des possibilités d'expression très variées. On trouvera en annexe V la "recette" utilisée en Pologne pour l'établissement des schémas canoniques; ce n'est en somme qu'un procédé pour ne rien oublier, mais cela ne donne pas le moyen d'établir un schéma clair.

Les plans 4 et 5 de l'annexe IV montrent deux versions du schéma canonique correspondant aux plans classiques et au schéma type électrique du réseau représenté par les plans 1 et 2 de la même annexe.

Le plan 4 ne s'est pas assez dégagé des contingences de la topographie; le plan 5 réussit à supprimer les chevauchements au moins pour les circuits principaux, et met beaucoup mieux en lumière la structure générale du réseau, et en révèle le caractère "maillé".

Ces schémas sont donc bien capables de rendre compte de la structure des réseaux et permettent d'étudier au moins qualitativement l'interaction de deux (le cas échéant, plusieurs) sources aéromotrices en action simultanée; on en fera largement usage dans les chapitres suivants qui ont précisément pour objet l'étude de cette interaction et des conclusions pratiques à en tirer.

Fig. 6
Schéma topographie simplifiée

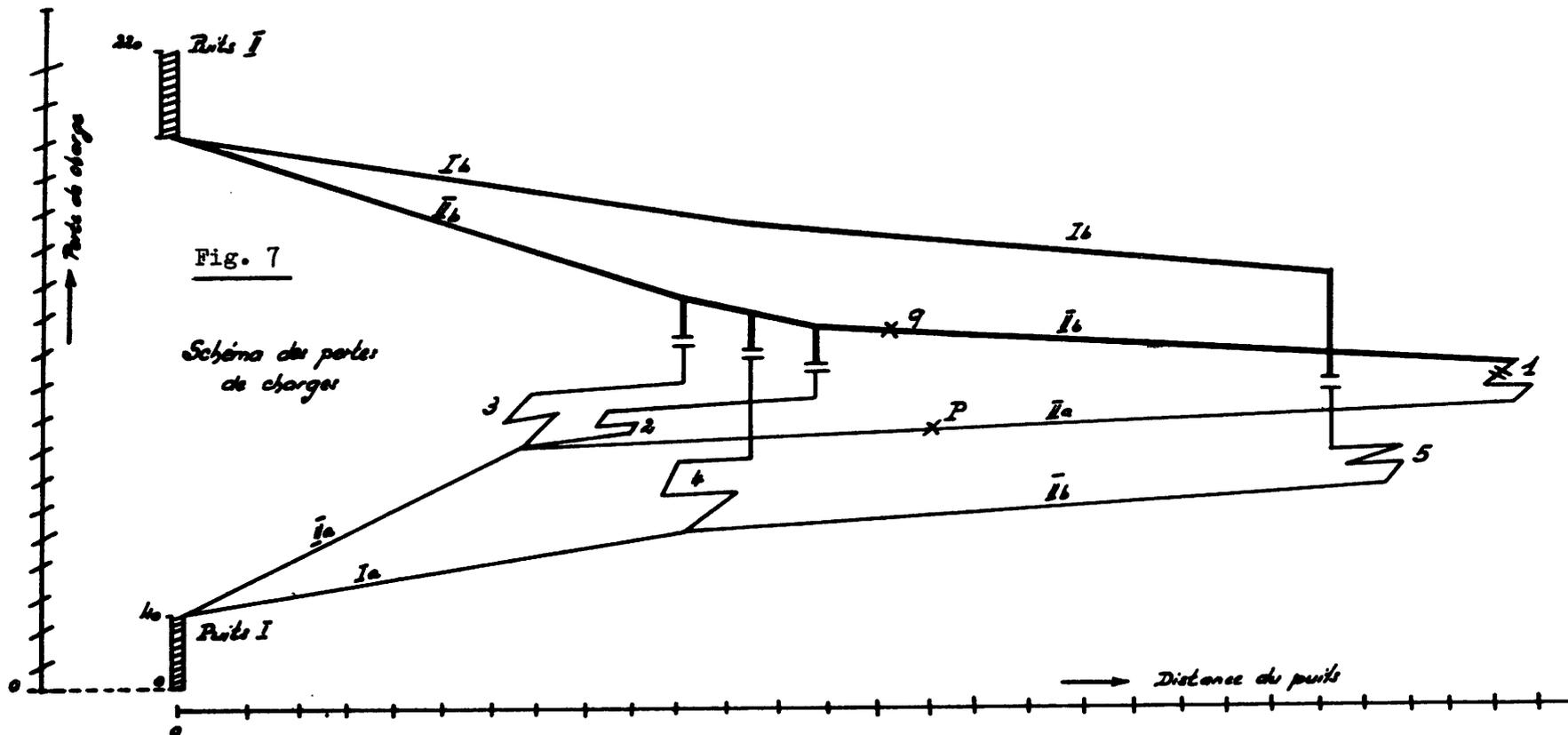
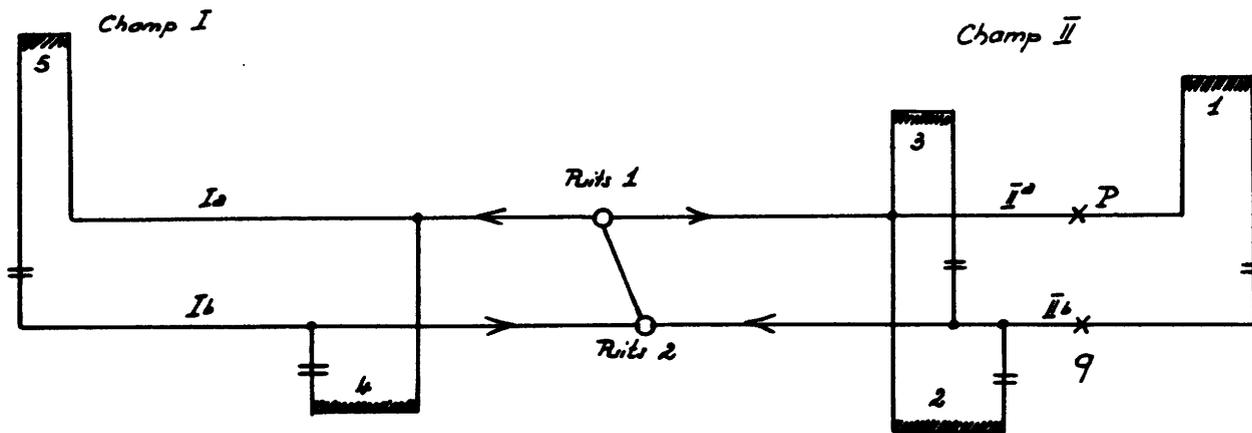


Fig. 7
Schéma des pertes de charges

Mais ces schémas ne rendent pas compte de l'élément particulièrement important de l'écoulement de l'air dans un réseau d'aéragé qu'est la perte de charge.

Diverses solutions ont été envisagées pour représenter cette perte de charge :

- Les mines d'Etat des Pays-Bas utilisent un schéma selon fig. 6 et 7 où l'on porte en abscisses approximativement les distances des différents points du réseau aux puits d'entrée et de retour d'air et en ordonnées la perte de charge par rapport à l'orifice du puits d'entrée d'air. Ce schéma permet de repérer rapidement la différence de charge (ou différence de potentiel aéromoteur) qui existe entre deux points quelconques, P et Q par exemple, du réseau et de mettre en lumière les tronçons ou zones du réseau où se produisent les plus grandes pertes de charge.

- BYSTRON, disciple de Budryk, propose purement et simplement de dessiner les schémas canoniques de telle façon que l'ordonnée de chaque "noeud" (ou carrefour de galeries) soit égale à la perte de charge de l'air circulant dans le réseau depuis l'orifice du puits d'entrée d'air; les abscisses n'ont pas de signification.

Dans ces conditions, le schéma de la fig.5 (réseau du puits Combes) deviendrait par exemple celui de la fig. 8 ci-après qui permet de "voir" sous quelle dépression effective circule l'air dans le réseau partiel étudié, abstraction faite du quartier Ouest et de la Couche de la Chana.

Comme on le verra plus loin, c'est cette dépression effective qui détermine le degré d'instabilité des courants d'air à l'intérieur du réseau partiel étudié.

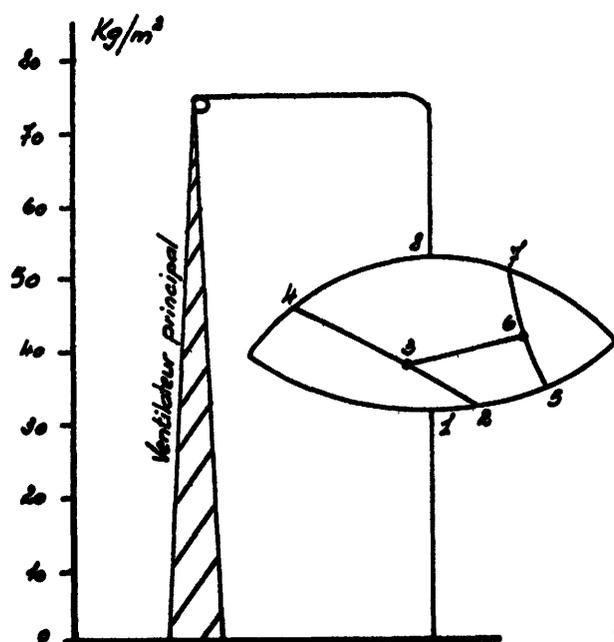


Fig. 8

Ce type de schéma permet, comme le précédent, de repérer la différence de potentiel aéromoteur qui existe entre deux points du réseau et de mettre en lumière les tronçons où se produisent les plus grandes pertes de charge, mais il n'impose aucune dimension dans le sens des abscisses, il permet donc toute latitude de représentation schématique.

Ce type de schéma, directement dérivé du schéma "canonique", est déjà d'application pratique en Pologne dans de nombreux cas, et il est question qu'il y soit prochainement rendu réglementaire.

- En Allemagne, chaque mine doit posséder un plan d'aérage établi en projections perspectives, qui comporte, entre autres renseignements, l'indication du potentiel aéromoteur de tous les noeuds.

CONCLUSION

Des schémas complètement dégagés des contingences dimensionnelles sont certainement nécessaires, aussi bien pour matérialiser des raisonnements purement théoriques sur l'aérage que pour représenter les caractères fondamentaux d'un réseau.

Si le schéma "canonique" ne diffère pas, en fait, du schéma type électrique si ce n'est par sa présentation, par contre le schéma Budryk fermé paraît seul susceptible de représenter l'interaction de deux (ou plusieurs) sources aéromotrices en activité simultanée sur un même réseau.

C'est à ce titre que ce genre de schéma doit être considéré comme faisant partie intégrante de la théorie de Budryk.

On fera largement usage dans ce qui suit aussi bien des schémas "ouverts" que des schémas "fermés".

CHAPITRE III

STABILITE DES COURANTS D'AERAGE

1 - Les réseaux d'aérage

On entend par réseau d'aérage non seulement l'ensemble complet des galeries normalement ouvertes et entretenues pour les besoins de l'exploitation, mais encore tous les circuits tels que vieux travaux ou voies abandonnées incomplètement obturés, toutes les fissures naturelles ou provoqués par l'exploitation qui permettent des circulations d'air entre galeries du réseau ou entre fond et surface.

Deux édifices miniers qui communiquent entre eux par le fond, ne serait-ce que par une seule liaison, constituent un seul réseau.

On appelle "branches" d'un réseau d'aérage les éléments qui canalisent des courants sans confluent ni dérivation, et noeuds les points communs à plusieurs branches, c'est-à-dire les points de confluence ou de division des courants.

Ces noeuds et ces branches peuvent se présenter sous deux configurations générales : en réseau simplement ramifié, ou en réseau maillé.

Un réseau simplement ramifié est un réseau composé uniquement de branches disposées en série ou en parallèle, de telle sorte qu'il peut être résolu en une résistance unique résultante, par association successive deux à deux des branches que l'on trouve toujours en série ou en parallèle. Les fig. 1 et 2 représentent en schéma fermé et en schéma ouvert un réseau simplement ramifié.

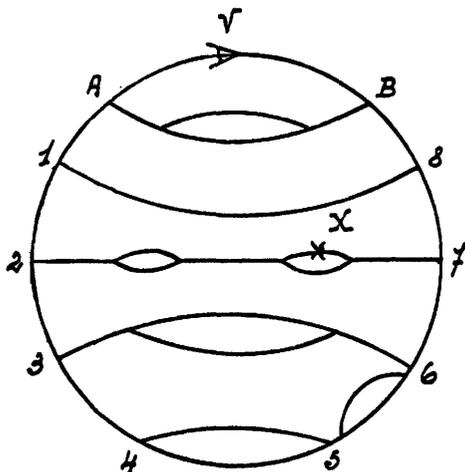


Fig. 1

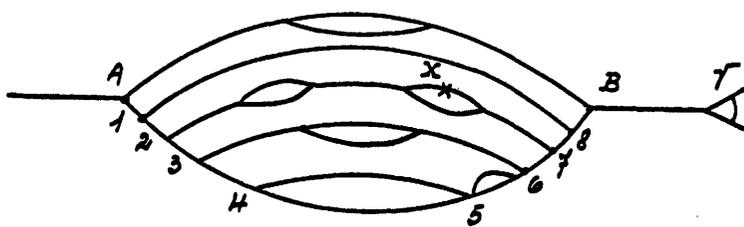


Fig. 2

La cellule fondamentale d'un réseau simplement ramifié est donc toujours constituée par la division d'un courant qui se reconstitue ensuite, selon fig. 3.



Fig. 3

Un tel élément sera appelé par la suite simplement "cellule fondamentale".

Propriété caractéristique des réseaux simplement ramifiés

La fig. 2 représente le schéma ouvert du réseau par rapport au point V. Le schéma ouvert par rapport à un point X quelconque reste toujours du type de la fig. 2 : la qualité de réseau simplement ramifié est bien une qualité intrinsèque de la structure du réseau.

Un réseau maillé, au contraire, est un réseau dont certaines branches relient les branches d'un réseau simplement ramifié qui en forme l'ossature; un tel réseau ne peut pas être résolu en une résistance unique résultante par association successive deux à deux de ses branches, car on ne les trouve pas toutes en série ou en parallèle.

La cellule caractéristique la plus simple d'un réseau maillé est constituée, selon fig. 4, par une branche "formant pont" dans une cellule fondamentale.

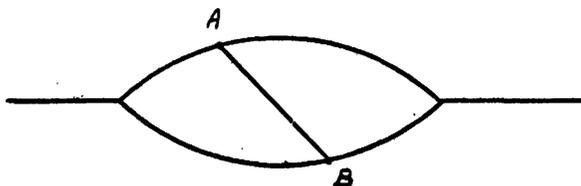


Fig. 4

La branche AB, caractéristique du maillage d'un réseau est appelée "diagonale".

Il y a des maillages plus complexes que le maillage élémentaire représenté par la fig. 4. Les fig. 5, 6 et 7 en sont des exemples.

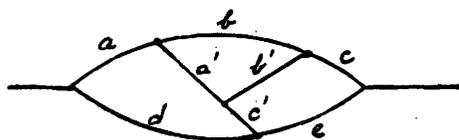


Fig. 5

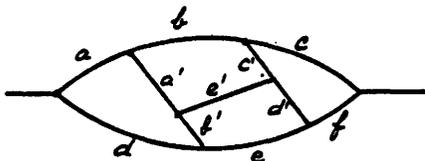


Fig. 6

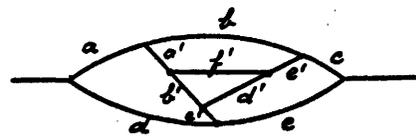


Fig. 7

Les branches a, b, c, d, e, etc qui appartiennent à la cellule fondamentale sont appelées "éléments de cellule fondamentale"; par contre, toutes les autres branches a', b', c', d', e' etc.... sont toutes appelées "diagonales", quelle que soit la complexité du maillage.

Il est intéressant d'examiner comment se forment les diagonales par ouverture d'une simple liaison entre deux branches d'un réseau simplement ramifié ou par une modification apparemment sans effet apportée à la disposition des puits d'une mine, par exemple.

Premier exemple :

La liaison XY ajoutée à un réseau simplement ramifié (fig.8 et 9) crée une diagonale et il est curieux de constater que c'est la branche 7-X qui devient diagonale, la nouvelle liaison XY devenant élément de cellule fondamentale.

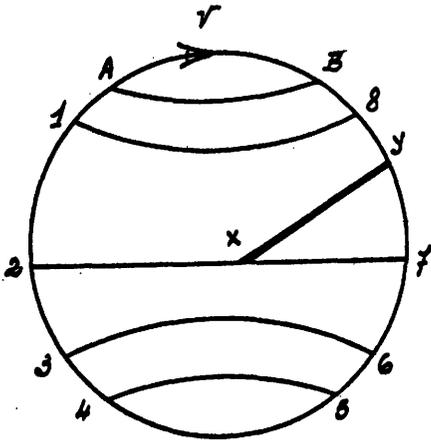


Fig. 8

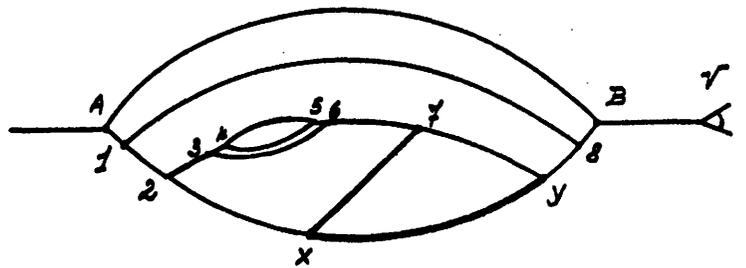


Fig. 9

Deuxième exemple :

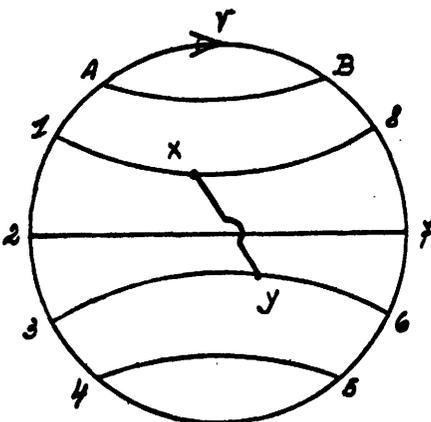


Fig 10

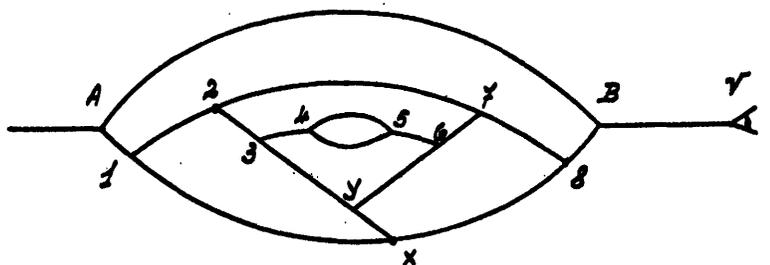


Fig 11

On voit que, par une seule liaison XY dans un réseau simplement ramifié (fig. 10 et 11), on a transformé en diagonales les branches 2-3, 3-4, 5-6, 6-7; 3-Y et Y-6, la liaison XY étant elle-même "diagonale".

Troisième exemple :

Soit une mine en aérage central selon fig. 12, schéma ouvert selon fig. 13.

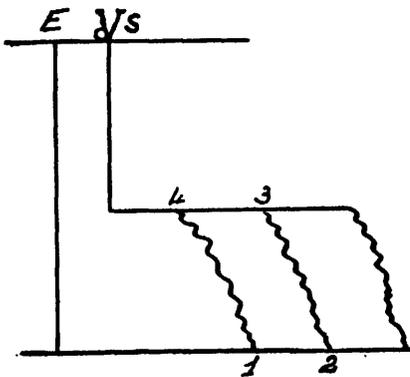


Fig 12

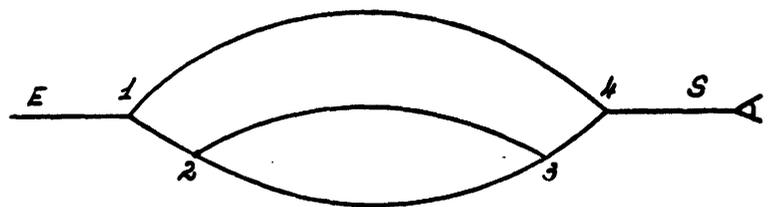


Fig 13

le réseau est simplement ramifié

Sans rien changer à la disposition des travaux, aérons par un puits "périphérique", selon fig. 14 et 15.

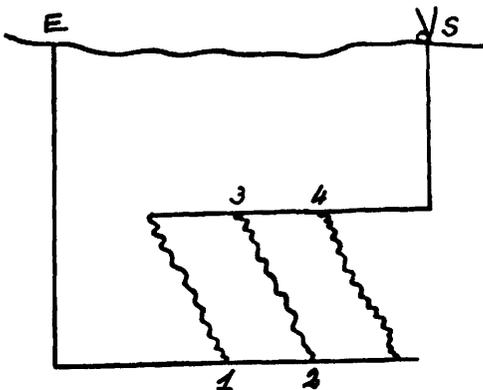


Fig 14

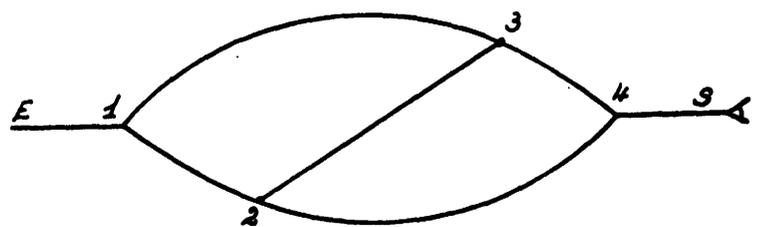


Fig 15

le réseau est devenu maillé.

Propriétés caractéristiques des réseaux maillés

Quel que soit le point du réseau par rapport auquel on fait un schéma "ouvert", on trouve des diagonales si le réseau est maillé; par contre, ce ne sont pas toujours les mêmes branches qui sont diagonales et cela dépend du point d'ouverture.

La qualité de "réseau maillé" est donc bien une qualité intrinsèque de la structure du réseau; par contre, la qualité de "diagonale" pour une branche est une qualité relative à la position du point d'ouverture (qui sera, plus loin, un emplacement de source aéromotrice).

En fait, la plupart des réseaux réels sont maillés et souvent de façon très compliquée, mais seule une analyse de la structure du réseau avec une représentation schématique adéquate permet de se rendre compte du maillage et surtout de déterminer quelles sont les branches diagonales et quelles sont celles qui ne le sont pas dans telle et telle condition; on en verra bientôt l'importance.

On entend par source aéromotrice toutes les causes susceptibles de provoquer une circulation de l'air dans un réseau. En dehors des sources aéromotrices normales que sont les ventilateurs, il existe de nombreuses autres sources aéromotrices dues à des phénomènes naturels qui sont susceptibles d'apparaître en des points quelconques des réseaux et d'avoir une influence importante sur l'aérage. Citons en particulier : les effets thermiques (ventilation naturelle - effets de cheminée des incendies, etc.....) les effets dynamiques tels que ceux qui sont provoqués par le déplacement des cages ou skips dans les puits, la chute d'eau ou de matériaux dans un puits ou une galerie inclinée, etc..... L'effet de Venturi dû à un changement de section de galerie peut jouer un rôle analogue à celui d'une source.

Une source aéromotrice est caractérisée par sa force aéromotrice exprimée en hauteur de colonne d'air, mais plus couramment en kg/m² ou en mm d'eau.

Les forces aéromotrices engendrées par les différentes sources fournissent à l'air un potentiel aéromoteur sous l'action duquel se produisent les courants.

Ce potentiel se consomme tout au long des circuits (pertes de charge), l'air circulant toujours d'un point de potentiel donné vers un point de potentiel plus bas, sauf à la traversée des sources aéromotrices qui précisément relèvent ce potentiel. L'écoulement de l'air dans les réseaux, qu'ils soient maillés ou simplement ramifiés, est régi par les 3 lois fondamentales suivantes :

- 1 - Les deux lois de Kirchhoff
- 2 - La loi de l'écoulement $H = RQ^2$

Ces trois lois sont, à la forme de la loi d'écoulement près, les lois de circulation de l'électricité dans des réseaux conducteurs.

Une caractéristique fondamentale des réseaux d'aérage est que le débit d'air qui parcourt chacune des branches d'un réseau est dépendant :

- a) de l'activité de chacune des sources aéromotrices présentes dans le réseau
- b) de la résistance de chacune des branches du réseau,

de sorte qu'aucun courant d'aérage n'est insensible à une modification quelconque survenant soit dans l'intensité ou la répartition des sources aéromotrices dans le réseau, soit dans les résistances des différentes branches, en un point quelconque du réseau.

2 - Stabilité de débit et stabilité de direction

Il résulte de ce qui précède qu'aucun courant d'aérage d'un réseau n'est absolument stable, au sens strict du mot; mais pour un courant qui diminue sous l'influence d'une modification survenant dans le réseau, il peut arriver, dans certaines circonstances, que son débit aille jusqu'à s'annuler ou même changer de sens.

Ce sont les courants susceptibles de s'inverser dans certaines conditions que nous appellerons instables dans ce qui suit.

Nous allons maintenant étudier dans quelles circonstances pratiques, telle ou telle branche d'un réseau peut être le siège d'un courant instable.

La condition fondamentale de la stabilité du courant dans une branche donnée AB est que le potentiel aéromoteur du point A noté habituellement H_A soit, en toutes circonstances, supérieur à celui du point B, H_B .

Les conditions qui créeront l'instabilité seront donc celles qui seront susceptibles de porter le potentiel aéromoteur du point B au-dessus de celui du point A.

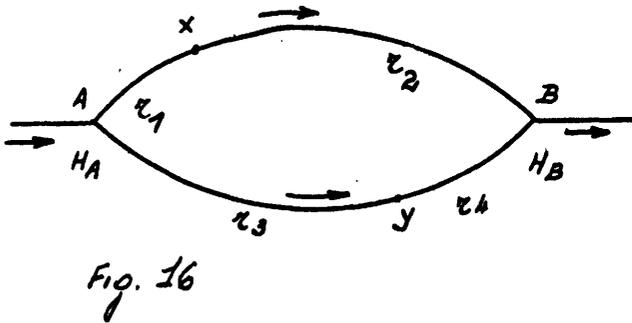
3 - Instabilité du premier ordre ou instabilité de structure

Branches diagonales

Les diagonales (qui n'existent que dans des réseaux maillés) sont des branches telles que le courant qui y circule est susceptible d'inversion sous l'influence de la seule variation de résistance d'une branche voisine qui peut être :

- soit un élément de la cellule fondamentale qui la contient
- soit une autre diagonale de la même cellule.

Considérons une cellule élémentaire, fig. 16, où l'air circule de A vers B ($H_A > H_B$), et deux points X et Y quelconques de chacune des deux branches,



si r_1 est la résistance du tronçon AX
 r_2 est la résistance du tronçon XB
 r_3 est la résistance du tronçon AY
 r_4 est la résistance du tronçon YB

Fig. 16

le potentiel aéromoteur du point X est :

$$H_X = H_A - (H_A - H_B) \frac{r_1}{r_1 + r_2}$$

celui du point Y est :

$$H_Y = H_A - (H_A - H_B) \frac{r_3}{r_3 + r_4}$$

Si on a $\frac{r_1}{r_1 + r_2} = \frac{r_3}{r_3 + r_4}$ ou $\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}$

les points X et Y sont au même potentiel. Si donc il existe une diagonale reliant les points X et Y, elle sera parcourue par un débit nul.

Si $\frac{r_1}{r_2}$ devient plus petit que $\frac{r_3}{r_4}$

le potentiel de X sera supérieur à celui de Y et un courant d'établira de X vers Y.

Du fait de ce courant, il y aura augmentation de débit dans AX et YB et diminution de débit dans XB et AY et, par conséquent, diminution du potentiel de X et augmentation du potentiel de Y; mais ceux-ci ne s'égaliseront jamais car alors le courant s'annulerait dans XY, imposant $\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}$ ce qui n'est pas.

Au contraire, si $\frac{r_1}{r_2}$ devient plus grand que $\frac{r_3}{r_4}$ un courant s'établira de Y vers X et subsistera.

On constate que ces conditions d'instabilité de la branche XY sont indépendantes de $H_A - H_B$ et, d'une façon plus générale, de l'activité et du nombre de sources aéromotrices placées en dehors de la cellule fondamentale.

Diagonales complexes

On pourrait voir dans le cas de la fig. 7 par exemple, et dans tous les cas que l'on peut imaginer, que, toujours en l'absence de sources aéromotrices à l'intérieur de la cellule fondamentale, toutes les diagonales sont instables en

fonction des seules variations de résistance des branches diagonales ou des branches appartenant à la cellule fondamentale qui les contient,

et ceci indépendamment de la différence de potentiel qui règne aux extrémités de la cellule fondamentale et de ses variations, pour autant qu'elle conserve le même sens.

Par contre, même dans une cellule maillée, les éléments de la cellule fondamentale sont stables quelles que soient leurs variations de résistance propres ou celles des diagonales qu'elles contiennent.

Degré d'instabilité

Même s'il règne une différence de potentiel importante entre les extrémités A et B de la cellule fondamentale, on voit (plus particulièrement dans le cas élémentaire de la fig. 16) que la différence de potentiel qui règne entre les extrémités d'une diagonale peut être si faible qu'une variation de résistance infime d'une branche voisine y provoque un arrêt ou une inversion d'aéragé.

C'est ainsi qu'il y a des cas où le seul passage d'un convoi de berlines dans une galerie provoque l'inversion d'aéragé dans une "diagonale" voisine.

Il y a donc des degrés dans l'instabilité des diagonales que l'on pourrait caractériser par la plus faible variation absolue ou relative de résistance de la branche qui a le plus d'influence sur sa stabilité et qui est susceptible d'y arrêter l'aéragé.

Une telle détermination peut être faite, dans les cas complexes à l'aide d'un simulateur d'aéragé.

Une autre conséquence importante des conditions de cette instabilité de structure est qu'il est impossible d'étudier la stabilité d'une branche si on n'étudie pas, sur un schéma clair, l'ensemble de la cellule fondamentale, à laquelle elle appartient.

Cas des réseaux simplement ramifiés

Il est aisé de voir que ce genre d'instabilité n'existe pas dans les réseaux simplement ramifiés, toujours en l'absence de sources aéromotrices à l'intérieur du réseau considéré et quel que soit le nombre de branches qui le compose. Cette propriété subsiste pour les éléments des cellules fondamentales des réseaux maillés.

L'annexe VI relate un exemple réel d'instabilité de structure qui s'est manifestée à l'occasion de la fermeture d'un barrage de lutte contre un incendie.

4 - Instabilité du second ordre ou instabilité dynamique

Nous avons jusqu'ici éliminé les cas où il existait des sources aéromotrices à l'intérieur des cellules étudiées, ainsi que ceux où la différence de potentiel aéromoteur aux extrémités des cellules fondamentales s'inversait, provoquant une inversion générale de tous les courants dans la cellule correspondante, et les cas des réseaux simplement ramifiés comportant d'autres sources aéromotrices qu'une source principale unique.

C'est qu'en effet l'existence de sources aéromotrices multiples à l'intérieur d'un réseau maillé ou non est une cause d'instabilité importante (et indépendante de la précédente) qui est d'ailleurs celle qui fait l'objet de la théorie du professeur Budryk.

Effets de sources aéromotrices multiples

Toute source aéromotrice active en un point quelconque d'un réseau provoque des courants dans toutes les branches de ce réseau, sans exception.

Lorsqu'il existe plusieurs sources aéromotrices en activité simultanée dans un réseau, il s'établit un régime résultant selon la loi suivante (1) :

Si toutes les sources aéromotrices existant dans le réseau tendent isolément à faire circuler

1) La formule de Budryk démontrera précisément cette loi dans les cas pour lesquels elle est établie. (Cette théorie ne s'applique pas automatiquement aux autres cas).

l'air dans le même sens, dans une branche donnée, le courant résultant dans cette branche, lorsque toutes les sources seront en action simultanément, sera de même sens.

Si, au contraire, une seule des sources aéromotrices tend à faire circuler l'air en sens inverse des autres, dans cette branche, il est impossible de dire a priori dans quel sens y circulera l'air lorsque toutes les sources aéromotrices seront simultanément en activité.

Il résulte de cette proposition que, dans tout réseau comportant plusieurs sources aéromotrices, il y aura des branches où le sens de l'aérage sera parfaitement déterminé et ne sera susceptible d'aucune inversion quelle que soient les puissances des sources en activité (en pleine activité ou arrêtées). Ces branches seront stables au sens de la stabilité du second ordre (ou stabilité dynamique); il y aura des branches où l'air circulera tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, suivant les puissances des sources en activité: ces branches seront instables au sens de la stabilité du second ordre.

Exemples :

Pour illustrer clairement cette loi, nous prendrons des exemples très simples.

1°) Soit un réseau selon schéma classique suivant fig. 17 et schéma Budryk fermé suivant fig. 18 et supposons une seconde source aéromotrice en V_2 .

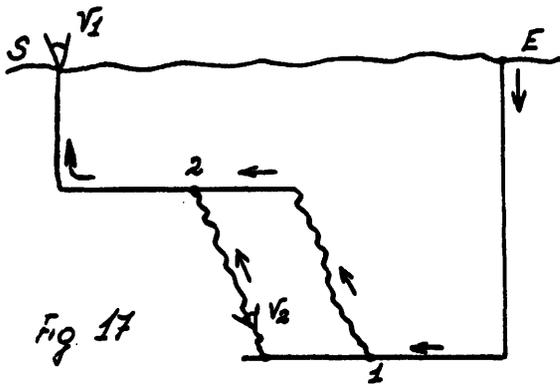


Fig. 17

Les courants d'aérage dus à la source aéromotrice V_1 seule sont indiqués par les flèches pleines et les courants dus à la source V_2 seule par les flèches pointillées.

On voit tout de suite que les branches $1-V_2-2$ et $2-V_1-1$ sont stables au sens de la stabilité du 2e ordre et que la branche $1-2$ qui ne contient pas V_2 est instable au sens de l'instabilité du 2e ordre.

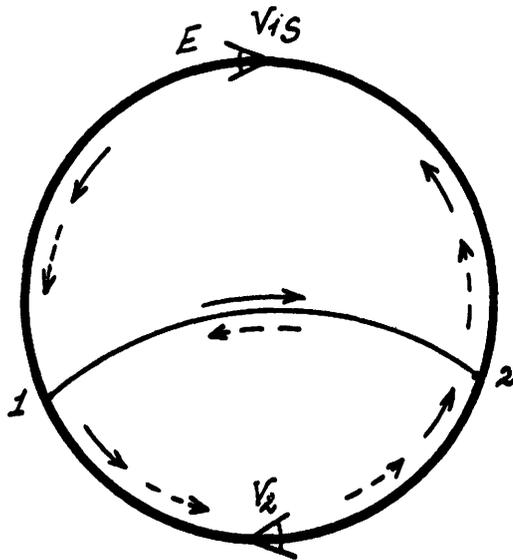


Fig. 18

2°) Même cas en aérage descendant (fig. 19 et 20)

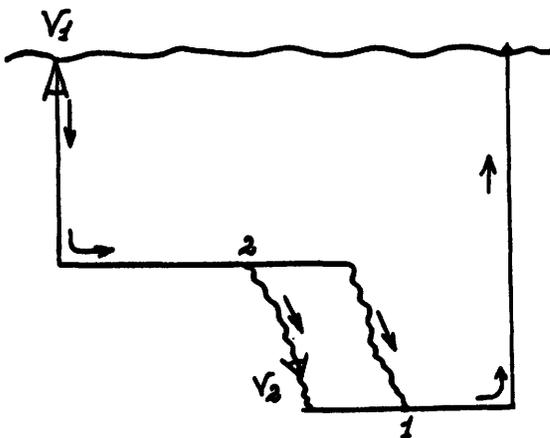
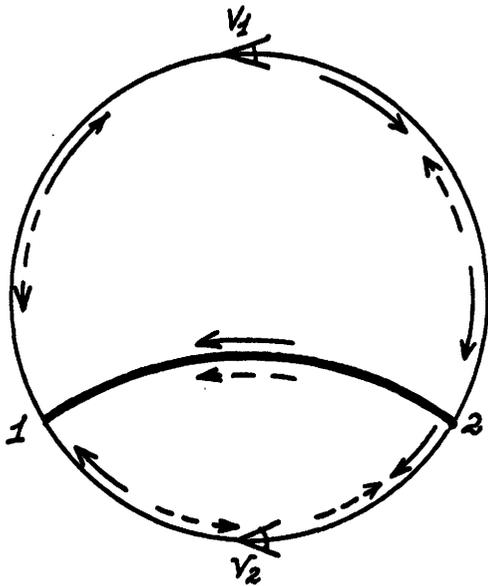


Fig. 19

Cette fois c'est la branche $1-2$ qui est stable au sens de la stabilité du 2e ordre et les autres branches qui sont instables.



Ces phénomènes d'instabilité de second ordre se présentent toujours lorsque les sources aéromotrices sont situées dans des branches différentes.

Fig. 20

On remarquera tout de suite que cette instabilité frappe les branches d'un réseau simplement ramifié tout autant que les diagonales d'un réseau maillé, que l'une, l'autre ou les deux sources aéromotrices soient en activité dans une diagonale ou dans un élément de cellule fondamentale. Les propriétés d'instabilité du premier et du second ordre sont donc indépendantes l'une de l'autre, une diagonale étant toujours frappée de la première et pouvant ou non être frappée de la seconde.

Sources aéromotrices "en harmonie" (ou concordance) ou "en opposition".

Lorsque, dans la branche où elle est située, une source aéromotrice tend à faire circuler l'air dans le même sens que le font circuler l'ensemble des autres sources, elle est dite "en harmonie" ou "en concordance" avec l'ensemble des autres sources.

Si on prend en considération deux sources seulement (cas de la fig. 18), cette qualité est réciproque. (1)

1) Ces propositions sont évidentes pour les cas élémentaires des fig. 18 et 20, elles seront admises comme postulats pour tous les autres cas.

Lorsqu'au contraire, dans la branche où elle est située, la source considérée tend à faire circuler l'air en sens inverse de celui engendré par l'ensemble des autres sources, elle est dite "en opposition" avec l'ensemble des autres sources.

Si on prend en considération deux sources seulement (cas de la fig. 20) cette qualité est également réciproque.

Circuits principaux

La notion de circuit principal, comme celle d'instabilité du 2e ordre, est liée à l'existence de sources aéromotrices multiples dans un réseau.

Un réseau d'aérage comporte toujours une ou plusieurs sources aéromotrices normales disposées pour assurer la ventilation normale de l'édifice minier.

L'une au moins (1) des sources normales est le ventilateur principal, installé en surface (ou dans une situation équivalente); elle est généralement appelée pour cette raison "source externe". Cette source(1) assure, dans tous les cas (sauf celui d'incendie dans le puits d'entrée d'air), l'arrivée d'air frais dans la mine et l'évacuation de l'air vicié.

Les autres sources aéromotrices qui peuvent être normales (ventilateurs auxiliaires) ou accidentelles (incendies, irruption d'eau, etc.....) agissent toujours dans une branche interne du réseau. C'est pourquoi on les désigne généralement sous le nom de "sources internes". C'est leur présence qui provoque les cas d'instabilité du second ordre.

On appelle circuit principal d'une source aéromotrice interne le circuit constitué :

- d'une part, par l'entrée d'air normale depuis la surface jusqu'à cette source
- d'autre part, par le retour d'air normal depuis cette source jusqu'à la surface.

1) Voir dans l'exemple en annexe VII comment on peut ramener le cas de ventilateurs principaux multiples au cas du ventilateur principal unique lorsque ces ventilateurs sont en marche enclenchée.

Les branches qui constituent ce circuit sont les branches du circuit principal, toutes les autres sont appelées "branches latérales".

On voit que tous les circuits principaux d'un réseau (un par source interne) passent par la surface et, par conséquent, par un ventilateur principal.

On conçoit aisément l'importance qui s'attache à la stabilité des circuits principaux : on voit sur les schémas simples des fig. 18 et 20 que le circuit principal d'une source interne "en harmonie" est stable et qu'au contraire le circuit principal d'une source "en opposition" est instable.

Cette proposition se généralise aux réseaux quelconques; on verra par la suite son importance pratique considérable.

On trouvera en annexe VII l'étude de deux cas réels d'inversion inopinée concernant une situation d'instabilité du premier ordre et une situation d'instabilité du second ordre, en présence de trois sources aéromotrices.

Degré d'instabilité

Comme dans le cas de l'instabilité du premier ordre, on conçoit aisément que, dans une branche où l'instabilité du 2e ordre est possible qualitativement, une inversion d'aérage ne se produise en fait jamais si l'action de la source antagoniste reste toujours très inférieure à l'action de la source normale.

Cette approche quantitative de l'instabilité du 2e ordre dans le cas de sources aéromotrices "en harmonie" est plus précisément l'objet de la théorie du professeur Budryk.

Les chapitres qui suivent s'attacheront à cet exposé.

CHAPITRE IV

THEORIE DE LA STABILISATION DE L'AERAGE EN CAS D'INCENDIE

1- Effet aéromoteur d'un incendie

L'effet de cheminée créé par les fumées chaudes d'un incendie dans les galeries inclinées qu'elles parcourent, est un phénomène complexe qui résulte à la fois :

- a) d'une diminution de la masse volumique des gaz à leur passage sur l'incendie, due principalement à l'élévation de température qu'ils subissent, qui peut atteindre et même dépasser 1 000°C (1), et secondairement du dégagement de vapeur d'eau;
- b) d'une augmentation de cette masse volumique par suite de la formation de gaz carbonique aux dépens de l'oxygène et de produits de distillation divers dus à l'élévation de température;
- c) de la variation des autres caractéristiques physiques du gaz qui circule dans les galeries intéressées, en particulier de la viscosité, elle-même fonction de la température et de la composition chimique des fumées.

Dans l'ensemble, et en première approximation, l'effet largement prépondérant est la diminution de masse volumique due à l'élévation de température, qui provoque, par effet de vases communicants avec les galeries restées à température normale, un effet aéromoteur donné approximativement par la formule :

$$\Delta H = \Delta Z \times \frac{\Delta t}{T}$$

1) Suivant un document de travail n° 5688/62 -
Traduction d'un article d'Ougol Ukrainy 4 - 1960 -
fasc. 7 pp. 16 à 20

où ΔH = effet aéromoteur en mètres de colonne de fluide dans la zone occupée par les gaz chauds

ΔZ = différence d'altitude en mètres entre les extrémités de la zone occupée par les gaz chauds

Δt = augmentation de température moyenne dans la zone occupée par les gaz chauds

T = température absolue moyenne dans la zone considérée, en temps normal.

Ainsi, pour $\Delta Z = 100$ m (hauteur d'étage courante)

$\Delta t = 200^\circ$ (élévation de température relativement peu importante)

T = 286°

on trouve $\Delta H = 70$ m de colonne de gaz d'incendie ou 49 mm d'eau (avec $\gamma = 0,7 \text{ kg/m}^3$)

En fait, et selon les calculs rapportés dans l'annexe III, compte tenu des effets rappelés ci-dessus, on trouve que l'effet de cheminée passe par un maximum pour une élévation de température moyenne d'environ 300° dans la zone considérée, si bien que la formule approchée ci-dessus donne une valeur approchée par excès de l'ordre de 10 % dans l'exemple choisi : l'effet aéromoteur réel reste donc de l'ordre de 45 mm d'eau, ce qui est considérable.

En résumé, un incendie crée dans les galeries inclinées, parcourues par ses fumées chaudes, un effet aéromoteur important qui peut être de l'ordre de grandeur de 5 mm d'eau par 10 mètres de dénivellation et dirigé de bas en haut.

Tout se passe donc comme s'il apparaissait, dans toute galerie inclinée parcourue par les fumées chaudes d'un incendie, un ventilateur soufflant de bas en haut avec une force aéromotrice appropriée.

Pour l'étude des effets d'un incendie sur l'aéragé, nous pourrions donc remplacer l'effet de cheminée, partout où il se manifeste, par des ventilateurs fictifs qui seraient installés dans les galeries intéressées à la manière de ventilateurs auxiliaires.

Cet artifice nous permettra de ramener l'étude des perturbations causées à l'aéragé par un incendie aux problèmes de stabilité posés par l'existence de sources aéromotrices multiples dans un réseau.

NOTA : Lorsque des fumées d'incendie encore chaudes parcourent des galeries horizontales, elles ne créent aucun effet aéromoteur, mais elles modifient les conditions d'écoulement, ce qui revient à dire qu'elles augmentent la résistance apparente des galeries:elles pourront donc provoquer des inversions d'aéragé dans des cas d'instabilités du premier ordre (diagonales)¹). Ces cas ne font pas l'objet de la théorie de Budryk. Nous ne les étudierons pas plus avant.

D'autres phénomènes, tels que le reflux des fumées en cas d'incendie évoluant très rapidement, presque explosivement, sont connus, mais ne seront pas non plus étudiés ici.

1) Voir exemple chap. V a) - fig 1.

2 - Risques d'inversion d'aérage en cas d'incendie dans des travaux pentés

Nous avons vu que l'action d'un incendie sur l'aérage, lorsque les fumées chaudes parcourent des voies inclinées, est équivalente à celles de ventilateurs soufflant de bas en haut dans les voies intéressées.

Il y a donc deux cas à considérer, selon que l'air circule normalement dans les galeries intéressées en montant ou en descendant.

NOTA : Pour ne pas raisonner d'emblée sur les cas les plus complexes, nous supposerons, dans ce qui suit, que la ventilation principale a lieu sous l'action d'un ventilateur unique, ou peut se ramener à ce cas.

A - Aérage descendant

Le ventilateur représentant l'effet aéromoteur de l'incendie, étant monté de façon à souffler de bas en haut, sera donc monté en opposition avec l'effet du ventilateur principal.

Nous avons vu, au chapitre précédent, que dans ce cas le circuit principal, c'est-à-dire celui qui contient les deux sources, est toujours instable, mais que, par contre, ce sont les branches latérales qui sont stables.

Ceci signifie que, lorsque un incendie prend naissance dans une galerie en aérage descendant, l'instabilité se manifeste d'abord dans la galerie intéressée par l'incendie; elle peut aller jusqu'à provoquer l'envahissement de toute la mine par les fumées; spécialement dans les mines à aérage naturel ou en cas d'arrêt volontaire ou accidentel de la ventilation principale. L'envahissement a lieu par les entrées d'air.

Dans ces conditions, tout accès au feu par l'entrée d'air présente d'emblée de grands risques et tous les chantiers branchés sur la même entrée d'air sont menacés de proche en proche.

Les Polonais estiment avec Budryk que, dans ces conditions, plutôt que de compter sur une stabilisation d'aéragé dans des conditions dangereuses et aléatoires, il vaut mieux appliquer des mesures préventives autres, qui seront passées en revue au chapitre suivant qui traite des règles pratiques.

Le cas très particulier de l'incendie dans un puits d'entrée d'air sera examiné à cette occasion.

En conséquence, Budryk n'a pas établi de règle pratique de stabilisation de l'aéragé en cas d'un incendie en aéragé descendant et, il doit être bien clair que ce qu'on appelle théorie de Budryk dans le présent document s'applique uniquement au cas des incendies en aéragé montant.

B - Aéragé montant

Dans ce cas, l'effet aéromoteur de l'incendie ou son ventilateur équivalent sont "en harmonie" ou "en concordance" avec le ventilateur principal.

Nous avons vu, au chapitre précédent, que dans ce cas le circuit principal est toujours stable, ce qui garantit par conséquent que l'on pourra accéder sans danger au feu du côté de l'entrée d'air aussi longtemps qu'il n'y aura eu aucune inversion d'aéragé dans les branches latérales; en effet ce sont ces branches qui sont instables, par conséquent susceptibles de ramener des fumées dans les chantiers voisins par le retour d'air et par voie de conséquence sur l'entrée d'air du feu.

Dans ce cas aussi l'ensemble de la mine peut être envahi par les fumées, spécialement dans les mines à aérage naturel ou en cas d'arrêt volontaire ou accidentel de la ventilation principale, mais cette fois l'envahissement se fait par les voies de retour d'air.

Ce cas étant de beaucoup le plus courant dans les mines et comportant une solution pratique intéressante est celui qui fait précisément l'objet de la théorie du professeur Budryk.

3 - Formule fondamentale de Budryk

a) Cas élémentaire

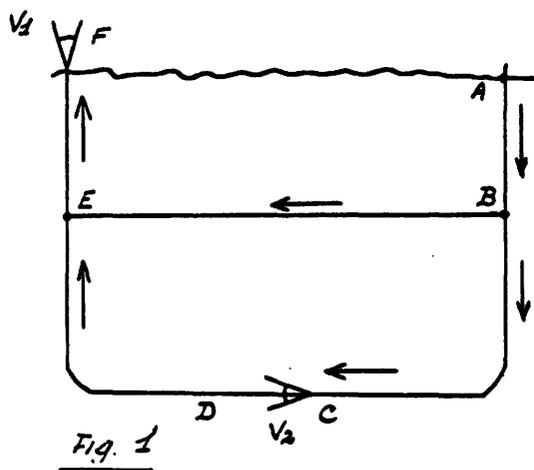


Fig. 1

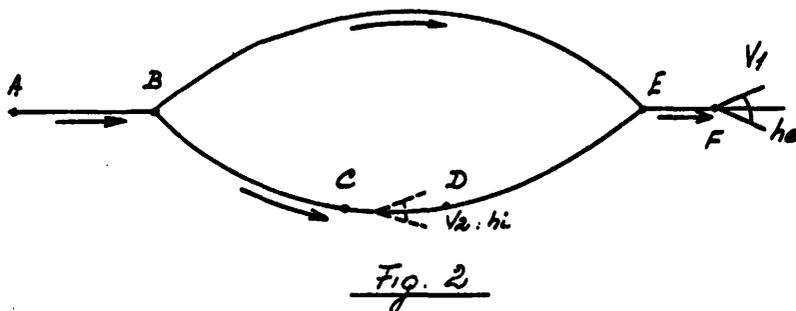


Fig. 2

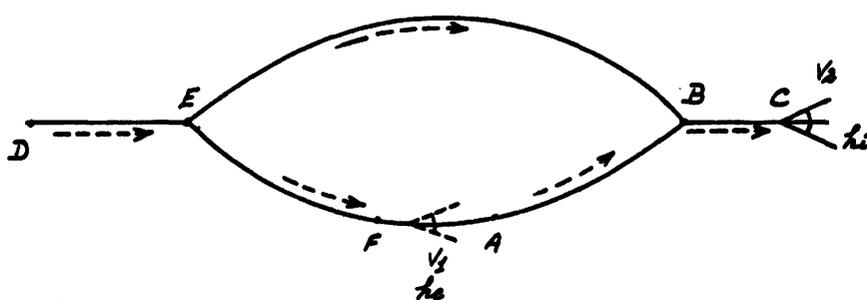


Fig 3

Le réseau ne comporte que 2 branches : schéma d'aérage fig. 1, schémas canoniques, fig. 2 et 3 et schéma Budryk fig. 4

V_1 représente par exemple le ventilateur principal, h_e sa force aéromotrice, V_2 l'effet d'incendie, de force aéromotrice h_i .

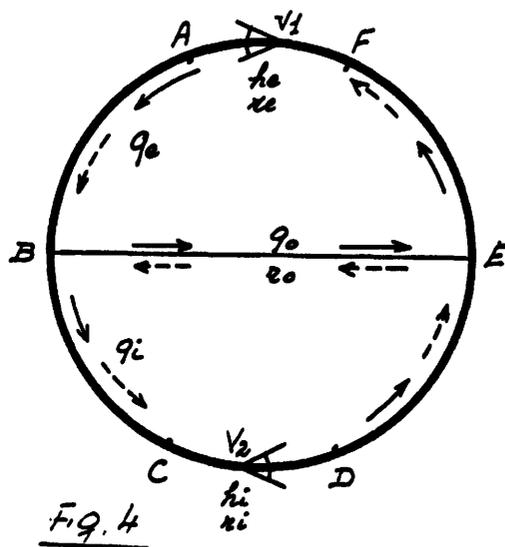


Fig. 4

Soient : $\begin{cases} q_e & \text{le débit dans la branche EFAB} \\ r_e & \text{la résistance de cette branche} \end{cases}$
 $\begin{cases} q_i \\ r_i \end{cases}$ les éléments correspondants de la branche BCDE
 $\begin{cases} q_o \\ r_o \end{cases}$ les éléments correspondants de la branche BE

La condition nécessaire et suffisante pour que la circulation de l'air se fasse dans le sens normal de B vers E est que le potentiel aéromoteur H_B du point B soit supérieur au potentiel aéromoteur H_E du point E.

Les équations fondamentales de l'écoulement des fluides écrites pour les circuits fermés

EFAB d'une part
BCDE d'autre part
et aux noeuds B et E

donnent, en remplaçant $r_o q_o^2$ par $(H_B - H_E)$:

$$h_e - r_e q_e^2 - (H_B - H_E) = 0$$

$$h_i - r_i q_i^2 + (H_B - H_E) = 0$$

$$q_e - q_i - q_o = 0$$

$$H_B - H_E > 0 \text{ entraîne :}$$

$$h_e > r_e q_e^2$$

et

$$h_i < r_i q_i^2$$

$$\text{et puisque } q_e > q_i \quad \frac{h_e}{r_e} > \frac{h_i}{r_i}$$

$$\text{ou } \frac{\frac{h_e}{h_i}}{\frac{r_e}{r_i}} > \frac{r_e}{r_i} \quad (a)$$

qui est la formule fondamentale de Budryk

ou expression mathématique de la condition de stabilité de l'aérage dans la branche étudiée.

Discussion de la formule

1°) Pour $\frac{h_e}{h_i} = \frac{r_e}{r_i}$, on voit facilement que

$q_0 = 0$, l'égalité des rapports correspond donc à l'arrêt d'aérage dans la branche BE, situation effectivement limite de la stabilité.

2°) Le fait que la résistance r_0 de la branche, dans laquelle on étudie l'instabilité, n'intervient pas dans la formule, tient à ce que l'on considère ici la condition $H_B = H_E$ comme condition limite de stabilité, il ne faudrait pas en conclure que, dans le cas général, la résistance de cette branche n'intervient jamais dans les conditions de sa propre stabilité. Ceci apparaîtra par la suite.

b) Cas des réseaux simplement ramifiés

Soit le réseau simplement ramifié :

schéma d'aérage selon fig. 5

schémas canoniques pour V_1 selon fig. 6

et pour V_2 selon fig. 7

schéma Budryk selon fig. 8

où V_1 représente, par exemple, le ventilateur principal de force aéromotrice h_e , V_2 l'effet dû à l'incendie, de force aéromotrice h_i .

Fig. 5 - 6 - 7.

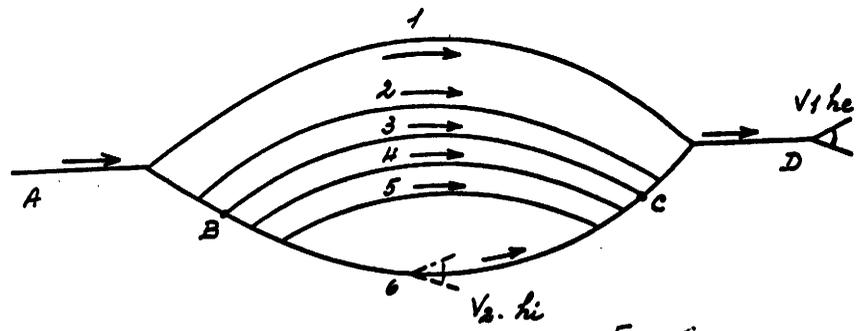
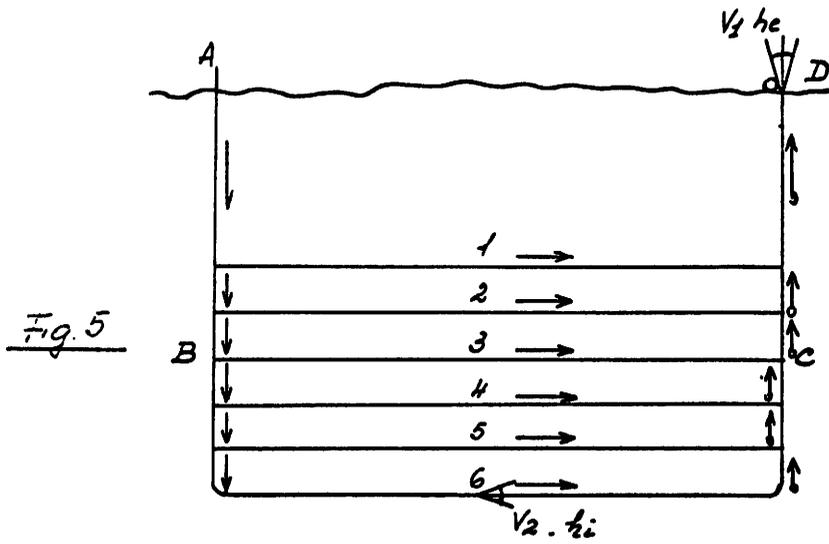


Fig. 6

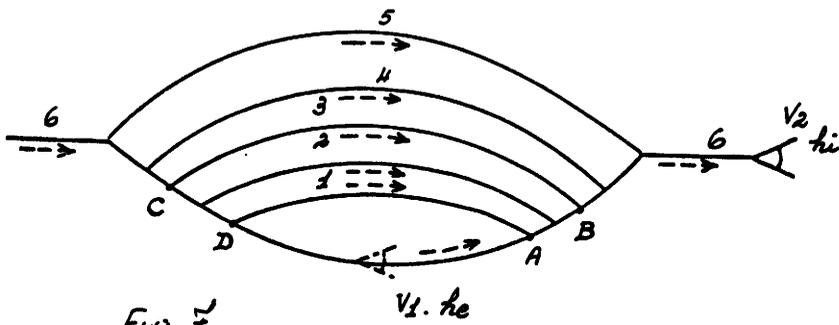


Fig. 7

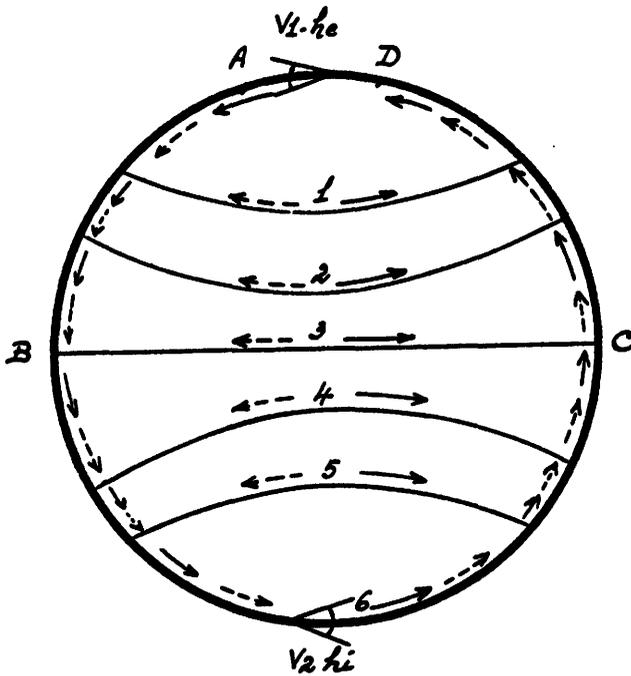


Fig. 8

Comme on l'a déjà vu au chapitre précédent, toutes les branches du circuit principal sont stables, toutes les branches latérales sont instables.

Le calcul des conditions de stabilité dans la branche latérale n°3(BC) dans le cas où l'inversion a déjà eu lieu dans les branches 4 et 5 (flèches en pointillé), peut être conduit comme dans le cas précédent, mais est plus compliqué : on le trouvera à l'annexe VIII.

Les résultats conduisent à une formule qui a la même forme que la formule fondamentale établie ci-dessus dans le cas élémentaire, et qui est :

$$\frac{h_e}{h_i} > \frac{R_e}{R_i} \quad (b)$$

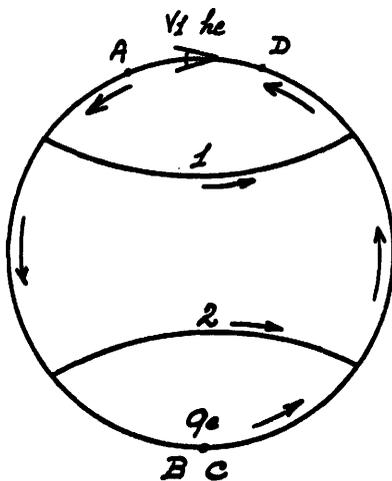


Fig. 9

où R_e et R_i sont des grandeurs qui ont les dimensions de résistances ($\text{kg m}^{-8}\text{s}^2$), et qui sont définies de la façon suivante :

Supposons réunis par une résistance nulle les points B et C, on obtient pour le demi-réseau "extérieur", limité par les points B et C et qui contient h_e , un schéma suivant fig.9; il s'établit, sous l'action de la force aéromotrice unique h_e , un courant de débit q_e dans la branche BC, qui définit R_e par la formule :

$$R_e = \frac{h_e}{q_e^2}$$

R_e est donc une grandeur parfaitement définie, dont l'expression algébrique en fonction des résistances des branches du demi-réseau "extérieur" est relativement simple. On en trouvera le calcul à l'annexe VIII.

On a adopté le symbole R pour cette grandeur car elle a bien les caractéristiques d'une résistance, mais ne correspond pas à une résistance équivalente au sens classique du terme.

L'expression algébrique montre que R_e est :

- fonction croissante des résistances des branches du circuit principal situées du côté he par rapport à BC
- fonction décroissante des résistances des branches latérales situées du côté de he par rapport à BC
- indépendante des résistances des branches du reste du réseau situées du côté de hi par rapport à BC.

R_i a, pour le demi-réseau intérieur la même définition et les mêmes propriétés que R_e pour le demi-réseau extérieur.

Comme pour le cas élémentaire, l'égalité $\frac{h_e}{h_i} = \frac{R_e}{R_i}$ correspond à l'arrêt d'aérage dans la branche BC.

L'annexe VIII établit que cette formule reste valable avec les mêmes définitions et les mêmes interprétations lorsque les deux demi-réseaux sont maillés, les seules conditions restant

- qu'il n'y ait qu'une seule source aéromotrice dans chaque demi-réseau
- qu'aucun "pont" ne relie les deux sous-réseaux
- que l'on soit dans la situation où l'inversion d'aérage est imminente dans la branche AB.

L'expression algébrique de R_e et R_i en fonction des résistances n'est, bien entendu, plus valable pour des réseaux maillés. Néanmoins R_e et R_i pourraient dans ce cas être mesurés sur un simulateur.

Discussion :

Revenons à l'ensemble du réseau. On voit alors qu'il n'est pas nécessaire qu'il existe une branche reliant BC pour définir R_e et R_i comme ci-dessus, à la seule condition qu'il n'y ait aucune autre liaison entre les deux demi-réseaux que les branches du circuit principal qui passent par B et C.

La condition fondamentale

$$\frac{h_e}{h_i} > \frac{R_e}{R_i}$$

exprime simplement que le potentiel aéromoteur de B est supérieur à celui de C ce qui signifie que si on les reliait par une galerie le courant s'y établirait de B vers C (sens normal); ceci entraîne que le courant est normal dans les branches 3-2-1 (mais n'entraîne pas ipso facto qu'il est inversé dans la branche 4).

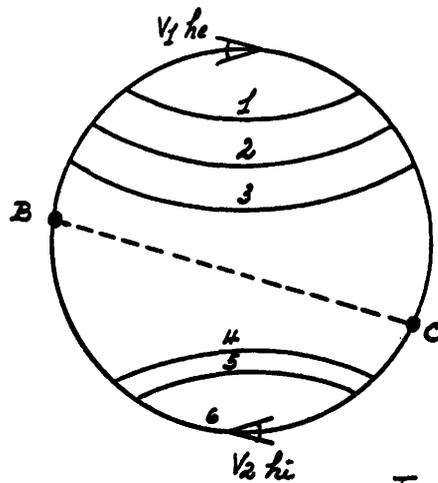


Fig. 10

Donc si le problème était bien de maintenir la stabilité de la branche 3, on voit que celle-ci doit faire partie du sous-réseau extérieur par rapport à deux points du circuit principal. Les conclusions pratiques seront tirées au chapitre suivant.

c) Généralisation de la formule

Dans la réalité, les réseaux d'aérage ne sont jamais simplement ramifiés et l'aérage normal est souvent obtenu à l'aide de plusieurs ventilateurs en surface ou au fond. Par ailleurs, ainsi que nous l'avons vu, l'effet aéromoteur dû aux fumées chaudes d'un incendie peut se manifester dans différentes branches du réseau. On doit donc envisager l'existence de plusieurs sources aéromotrices, aussi bien dans le sous-réseau intérieur que dans le sous-réseau extérieur. Enfin, il pourra exister des galeries ou faisceaux de galeries formant pont entre les deux sous-réseaux principaux.

Il convenait donc de voir si la formule fondamentale de Budryk conservait, dans tous les cas, une signification, et laquelle.

L'annexe (IX) établit que la formule applicable dans le cas le plus général d'instabilité du 2ème ordre dû à l'existence de sources internes multiples disposées individuellement, ou même seulement globalement en harmonie dans la ventilation principale, est toujours de la forme :

$$\frac{h_{em}}{h_{im}} > \frac{R_e}{R_i}$$

mais où les termes, bien qu'ayant dans l'ensemble la même signification que ceux qui figurent dans les formules sous a) et b) ci-dessus, ont des contenus très complexes en raison de la portée absolument générale de la formule.

Cette formule s'applique non plus à l'ensemble du réseau divisé en deux sous-réseaux, comme sous b) ci-dessus, car il est impossible de définir de façon précise deux sous-réseaux dans un réseau complexe quelconque, mais au champ de filets (1) des extrémités A et B de la branche dont on étudie la stabilité qui, lui, est parfaitement défini.

- h_{em} et h_{im} représentent, pour les champs partiels auxquels ils correspondent (externe et interne) la valeur moyenne pondérée des forces aéromotrices qui agissent sur les différents filets qui les composent. On voit tout de suite qu'il existe des sources aéromotrices qui n'interviennent pas dans la détermination de h_{em} ou h_{im} , ce sont celles qui ne sont pas traversées par les filets d'aérage qui passent à la fois par les points A et B. Ceci ne signifie pas que l'activité de ces sources n'influe pas sur la stabilité de la branche étudiée, mais qu'elles agissent indirectement :

- R_e et R_i sont les résistances équivalentes des champs partiels auxquels ils correspondent.

R_e et R_i ne sont pas les résistances des galeries qu'emprunte le champ de filets des points A et B, mais dépendent des débits des autres champs de filets du réseau qui empruntent les mêmes galeries (c'est de cette façon qu'agissent les sources extérieures au champ des points A et B).

1) Les courants qui parcourent un réseau peuvent toujours être analysés en "filets" ou "courants élémentaires" qui conservent un débit constant tout au long de leur parcours.

On appelle "champ de filets" de deux points A et B l'ensemble des filets qui passent à la fois par les points A et B. On distingue le demi-champ où les filets vont de B vers A et le demi-champ où les filets vont de A vers B (demi-champ externe et demi-champ interne), chaque demi-champ pouvant être composé de demi-champs partiels. L'annexe IX précise ces notions.

Naturellement, on retombe sur les formules des paragraphes a) et b) ci-dessus quand on applique la formule généralisée à ces cas particuliers.

L'annexe IX étudie l'action des différents facteurs possibles sur la formule fondamentale de stabilité, et justifie les règles pratiques que l'on exposera au chapitre suivant, leur conférant ainsi une valeur générale indiscutable.

4 - Portée pratique de la formule de Budryk

La forme de la formule et le contenu de ses termes ont une portée pratique considérable sous bien des aspects, en particulier :

a) Aucune mine n'est à l'abri d'inversions d'aérage en cas d'incendie

En effet, dans la mine où la ventilation est la plus puissante et la mieux étudiée, l'arrêt volontaire ou accidentel du ventilateur principal réduit la force aéromotrice h_e (ou h_{em}) à celle de la ventilation naturelle toujours faible, quelquefois nulle ou inversée : dans ce cas, l'incendie est le maître et rien ne s'oppose plus à ses effets néfastes sur l'aérage.

Dans un quartier éloigné d'une mine aérée par un ventilateur même à forte dépression, la force aéromotrice restante aux extrémités d'une branche (une taille par exemple) peut être extrêmement faible (R_e grand) et alors un incendie dans la taille voisine pentée, ou dans le bure de service du quartier, provoquera sans peine une inversion d'aérage, surtout si les veines sont puissantes et les galeries à grande section (R_i petit).

b) Délimitation des zones dangereuses

A condition de connaître toutes les caractéristiques du réseau et sachant que l'effet aéro-

moteur d'un incendie est limité quelle que soit sa violence (effet maximum vers 300°), on pourra déterminer, par le calcul dans les cas simples en aérage ascendant (1), ou à l'aide du simulateur électrique dans les cas complexes, et pour chaque incendie possible, quels sont les galeries ou les chantiers menacés d'inversion d'aérage, la ventilation normale étant en action ou arrêtée.

c) Mesures à prendre en cas d'incendie survenant en aérage montant

Cette formule permet de déterminer quelles sont les mesures à prendre en cas d'incendie pour éviter des inversions inopinées dans telle ou telle branche où l'on désire conserver un aérage normal.

Dans les cas complexes, seul le simulateur d'aérage permet de distinguer parmi les très nombreuses mesures possibles, celles qui sont susceptibles d'avoir une efficacité notable de celles qui ne peuvent avoir qu'une faible efficacité.

1) Voir exemple au chapitre II.

CHAPITRE V

PRATIQUE DE LA STABILISATION DE L'AERAGE EN

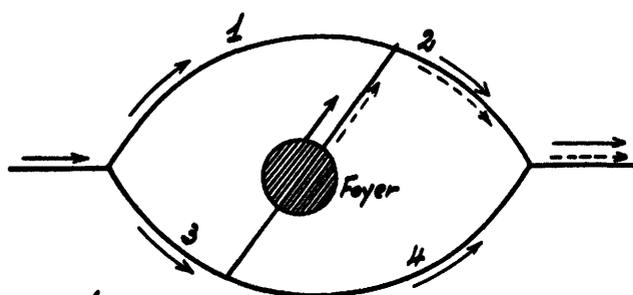
CAS D'INCENDIE

La règle d'or de toute lutte contre le feu étant l'attaque directe, aussi rapide et puissante que possible, du foyer d'incendie, ce souci primordial entraîne ipso facto celui d'éviter à tout prix toute inversion d'aéragé, soit dans la galerie en feu soit dans une galerie voisine, ce qui ramènerait dans les deux cas des fumées sur l'entrée d'air normale du feu et compromettrait ainsi la lutte contre le feu, en menaçant les équipes engagées dans cette lutte et aussi les équipes des chantiers voisins, ou même assez éloignés.

La première question que l'on doit alors se poser est de savoir si la galerie en feu et ses accès par l'entrée d'air ne sont pas frappés d'une instabilité du 1er ou du second ordre, due à la structure du réseau, indépendamment du feu.

Deux exemples montreront des cas classiques :

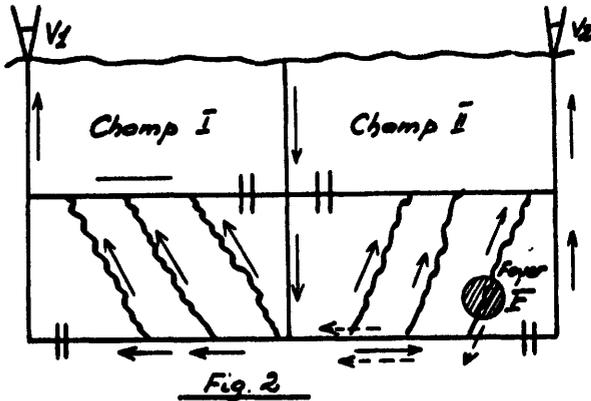
a) La galerie en feu est une diagonale (fig. 1)



les fumées parcourent le trajet des flèches en pointillé. Ceci fait augmenter la résistance apparente de la branche 2, ce qui peut provoquer l'inversion dans la branche incendiée. On pourra assurer la stabilité dans cette branche en freinant l'air dans les branches 1 ou 4 par exemple ou en ouvrant une porte dans la branche 3 s'il y en a une; le cas échéant par les deux manœuvres.

b) La galerie en feu est une branche instable d'un réseau d'aérage à plusieurs ventilateurs

b₁) Cas d'une ventilation diagonale selon fig. 2



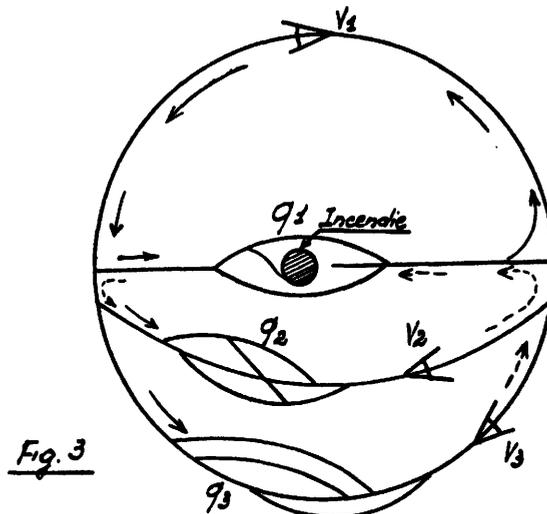
Soit un foyer en F dans le champ II : en cas d'arrêt accidentel du ventilateur du champ II, les fumées d'incendies refluent immédiatement sur toute l'entrée d'air et envahissent même le champ I.

Il faudra donc asservir V₁ à V₂ ou même, si les circonstances le permettent, arrêter purement et simplement le ventilateur V₁ pendant la lutte contre l'incendie.

b₂) Cas de ventilateurs auxiliaires dans les circuits voisins (voir l'exemple de schéma d'aérage de l'annexe IV.) Le schéma Budryk fermé correspondant à ce cas est celui de la fig. 3.

Il y a 3 quartiers Q₁, Q₂ et Q₃.

Un ventilateur principal V₁ assure l'aérage général, mais les quartiers Q₂ et Q₃ ont besoin de ventilateurs auxiliaires V₂ et V₃.



En cas d'arrêt de V_1 , il y a immédiatement inversion d'aérage dans le quartier Q_1 (flèches en pointillé). S'il est le siège d'un incendie, les fumées refluent vers son entrée d'air et envahissent les autres quartiers.

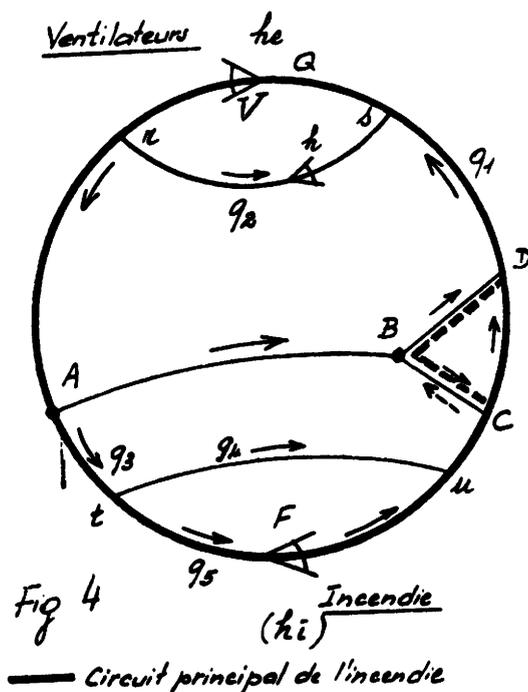
Comme dans le cas précédent, il faut donc asservir les ventilateurs V_2 et V_3 à V_1 ou arrêter V_2 et V_3 pendant la lutte contre l'incendie, si les circonstances le permettent.

Mais, soit que la branche d'aérage qui est le siège de l'incendie soit stable, soit que son instabilité de structure ait été corrigée, l'instabilité due à la seule présence de l'incendie subsiste.

Il y a alors deux cas à considérer, selon que la (ou les) force aéromotrice créée par l'incendie se manifeste en aérage montant (en harmonie ou concordance) ou en aérage descendant (en opposition).

CAS DE L'AERAGE MONTANT

On sait que, dans ce cas, tout le circuit principal du foyer d'incendie, c'est-à-dire les branches qui constituent son entrée d'air et les branches qui constituent le trajet des fumées, est stable, mais que ce sont les branches latérales, c'est-à-dire celles qui réunissent l'entrée d'air du feu à son retour d'air, qui sont frappées d'instabilité; ce sont donc elles qui sont susceptibles de ramener des fumées sur l'entrée d'air de l'incendie. On cherchera donc à éviter l'inversion d'aérage dans une branche latérale à l'incendie plus ou moins proche de lui, selon les circonstances : par exemple la branche A B de la figure 4.



Mais on sait (1) qu'une branche latérale telle que AB, qui ne relie pas directement deux noeuds de ce circuit principal est elle-même "une diagonale", ou débouche dans "une diagonale" (BC dans le cas de la fig. 4) où il faut s'attendre d'un moment à l'autre à une inversion d'aerage (flèche pointillée de la fig. 4) qui place alors la branche considérée dans la situation d'une latérale reliant deux noeuds du circuit principal.

La première inversion (C vers B) est une affaire de stabilité de diagonale qui ne risque en aucun cas de ramener des fumées sur l'entrée d'air de l'incendie: c'est l'inversion possible dans AB à laquelle on s'intéresse ici tout particulièrement.

Une telle branche définit sur le circuit principal deux zones dites zone externe et zone interne: la zone externe (BDVA sur la fig.4) est celle qui contient les puits et les ventilateurs principaux et la zone interne (AFCB) celle qui contient le foyer d'incendie.

Les mesures à prendre pour éviter toute inversion d'aerage dans la branche latérale choisie AB découlent directement de la formule fondamentale :

$$\frac{h_{em}}{h_{im}} > \frac{Q_e}{Q_i}$$

établie et discutée à l'annexe IX et présentée au chapitre IV où:

(1) voir annexe IX

- h_{em} représente la force aéromotrice moyenne pondérée des sources aéromotrices normales (ventilateurs) agissant directement du côté externe sur les filets du champ de filets des points A et B pour faire passer l'air dans le sens normal de A vers B dans la branche latérale choisie pour être stabilisée.
- h_{im} représente la force aéromotrice moyenne pondérée des sources aéromotrices accidentelles (fumées d'incendies) agissant directement du côté interne sur les filets du champ de filets des points A et B pour tendre à faire circuler l'air dans le sens inverse du sens normal dans la branche latérale choisie pour être stabilisée.

La pondération des forces aéromotrices est faite en fonction du rapport du débit qui passe par les sources aéromotrices intéressées au débit total du champ de filets correspondant. Ainsi, pour la fig. 4 par exemple, $h_{em} = h_e$ parce que tous les filets du champ externe des points A et B passent par la source h_e et $h_{im} = h_i \frac{q_5}{q_3}$

On voit ainsi que h_{em} est toujours de l'ordre de grandeur de la force aéromotrice des ventilateurs normaux d'aéragé, tandis que h_{im} peut être très inférieur à la force aéromotrice engendrée par les fumées d'incendies, aussi longtemps que l'inversion ne menace pas directement la branche choisie pour être stabilisée, c'est-à-dire que les branches latérales situées entre l'incendie et la branche choisie pour être stabilisée n'ont pas été le siège d'une inversion d'aéragé sous l'effet de l'incendie.

- R_e et R_i sont des résistances qui caractérisent la situation de la branche latérale AB choisie pour être stabilisée par rapport aux sources, antagonistes pour elle, h_e et h_i .

- R_e est relative à la zone "externe" définie par la branche AB sur le circuit principal. R_e est, dans tous les cas fonction croissante des résistances des branches de ce circuit principal et des débits qui empruntent les mêmes branches, mais qui appartiennent à d'autres champs de filets que le champ des points A et B.

Ceci revient à dire que R_e est fonction décroissante des résistances des branches latérales qui se détachent du circuit principal externe ou y aboutissent, et

fonction croissante de la force aéromotrice des sources qui existent en harmonie sur ces branches.

L'influence de la résistance des branches latérales et de l'activité des sources aéromotrices qui y règnent est généralement très importante (voir annexe IX)

R_i est relative à la zone interne définie par la branche AB.

Il y a alors 2 cas à considérer, suivant qu'il existe ou non des branches latérales parcourues par les filets du champ de filets des points A et B, entre la branche AB et l'incendie et suivant que ces branches sont ou non le siège d'inversions d'aérage.

S'il n'y a pas de telles branches latérales ou si l'aérage y est déjà inversé, R_i a, pour sa zone, les mêmes propriétés que R_e pour la sienne (voir ci-dessus) et $h_{im} = h_i$.

S'il existe de telles branches où l'aérage a conservé son sens normal, R_i est fonction croissante non seulement des résistances des branches du circuit principal interne et des débits étrangers qui y circulent, mais aussi des résistances des branches latérales. Par contre, h_{im} est plus petit que h_i dans le rapport du débit qui passe par l'incendie au débit total du champ de filets interne, débit passant par la branche AB exclu (voir h_{im} ci-dessus).

C'est généralement dans cette situation que l'on se trouve, dès l'éclosion d'un incendie.

Examinons maintenant, en en faisant la critique à la lumière de ce qui précède, les opérations ou manœuvres entreprises pour la lutte contre un incendie qui se déclare, et ce qu'il faut faire pour que l'opération puisse être menée à bien avec le minimum de risques.

La formule fondamentale montre que l'on devra chercher à :

- diminuer h_{im}
- augmenter h_{em}
- diminuer R_e
- augmenter R_i

pour éviter toute surprise par inversion d'aérage au cours de la lutte contre l'incendie.

A titre de remarque préliminaire, on notera d'abord qu'il est toujours difficile, sauf cas particulier, de diminuer la résistance d'une galerie, alors qu'au contraire il est toujours relativement facile de l'augmenter, dans de très grandes proportions, même avec des moyens de fortune. Le "contrôle" de l'aérage, dans un cas d'urgence comme celui qui nous intéresse sera donc réalisé à l'aide de fermeture de portes installées à l'avance, d'apposition de freins d'aérage, au besoin à l'aide de moyens de fortune et, le cas échéant, à l'aide de barrages que l'on rend de plus en plus étanche.

On notera aussi que la condition fondamentale de stabilité peut s'écrire

$$\frac{h_{em}}{R_e} > \frac{h_{im}}{R_i}$$

+

+

+

Pour la clarté de l'exposé, on examinera séparément les opérations menées au voisinage de l'incendie, qui font partie de la lutte directe, et les opérations qui exigent une vue d'ensemble de la situation générale faute de quoi elles peuvent conduire à des catastrophes.

On examinera séparément le cas des mines non grisouteuses et celui des mines grisouteuses.

1 - Opérations menées au voisinage de l'incendie

A) Cas des mines non grisouteuses

- Barrage de la galerie incendiée

En présence d'un incendie rebelle à l'attaque directe, la règle générale est de barrer le plus rapidement possible la galerie incendiée, au besoin par des moyens de fortune, puis d'améliorer progressivement l'étanchéité de ce barrage. C'est le barrage bo de la fig. 5, appelé barrage fondamental.

Cette manoeuvre, très classique, est tout à fait conforme à la théorie de la stabilisation de l'aérage puisque toute augmentation de résistance dans la branche incendiée elle-même augmente R_i en diminuant h_{im} de telle sorte que le rapport $\frac{h_{im}}{R_i}$ diminue dans des proportions considérables, quelle que soit la branche (voisine ou lointaine) par rapport à laquelle on considère ce rapport.

Cette manoeuvre est donc le plus sûr garant qui existe à la fois pour éviter le développement de l'incendie et le risque d'inversion dans une branche voisine; c'est à ce titre qu'elle doit être considérée comme la première mesure de sauvegarde d'urgence à prendre concurrentement et même, le cas échéant, avant l'attaque directe du foyer.

Il n'en est pas de même pour les autres opérations d'action sur les portes ou freins d'aérage existant au voisinage de la galerie incendiée.

- Barrage de la galerie voisine

Une application pure et simple de la formule fondamentale pourrait inciter à fermer une porte P dans la galerie voisine AoBo, ou à y apposer un frein d'aérage dans l'espoir d'augmenter R_i aussi longtemps que l'air circule normalement dans cette branche de Ao vers Bo.

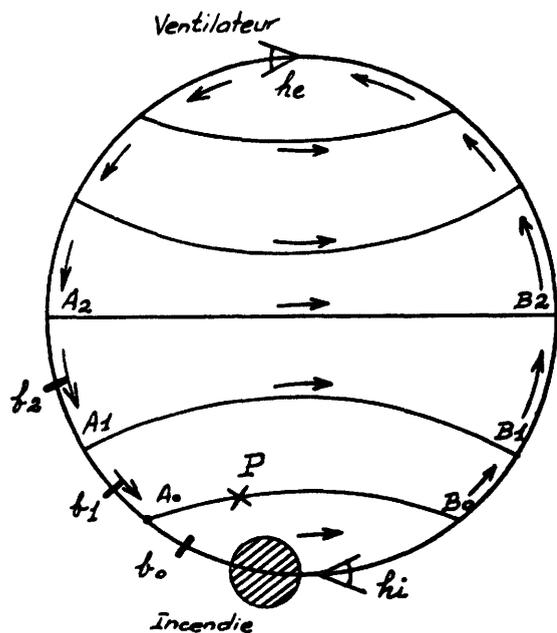


Fig. 5

Si on considère cette branche comme la branche à stabiliser la théorie conduit aussi à y préconiser l'augmentation de la résistance.

Mais une telle manoeuvre aurait pour première conséquence d'augmenter le débit d'air dans la branche incendiée, surtout si le barrage b_0 n'est encore qu'à l'état d'ébauche, ou en terrain très perméable à l'air et d'activer l'incendie ce qui, du point de vue pratique est absolument inadmissible.

En supposant même qu'il n'en résulte pas d'augmentation de "l'effet de cheminée" dû à l'incendie (h_i plus grand), on a vu à l'annexe IX, que la fermeture totale des branches latérales

internes (telles que $A_0B_0 - A_1B_1$ de la fig. 5) ne pouvait en aucun cas faire baisser la valeur de $\frac{h_i}{R_i}$ au-dessous de $\frac{h_i}{R_i}$,

R_i étant la résistance globale équivalente du circuit principal interne en l'absence de courant dans toutes les latérales (donc sa plus grande valeur possible en fonction de ces courants). C'est donc, en tout état de cause, la résistance de barrage b_0 qui conditionne la valeur du rapport fondamental $\frac{h_i}{R_i}$, et l'efficacité du barrage des

latérales ne peut qu'être négligeable devant celle du barrage du circuit principal. Mais, bien plus, si la situation devait empirer, comme ce peut toujours être le cas, une inversion d'aéragé s'amorçant sous l'action de l'incendie activé; le barrage des latérales serait alors très préjudiciable à la stabilité des branches suivantes qui seraient immédiatement menacées d'inversion. On a vu en effet que, dans cette situation, le barrage des latérales diminuait R_i dans des proportions pouvant être importantes.

On devra donc a priori s'abstenir de freiner l'aéragé dans les galeries latérales voisines du foyer d'incendie.

Barrage en amont-aéragé

Sous l'influence de conditions diverses en particulier en cas d'inversion de l'aéragé dans la branche AoBo, il peut arriver qu'il soit impossible de construire un barrage dans la branche incendiée, ou encore que l'on soit obligé de l'abandonner en cours d'érection.

Le barrage sera alors tenté en b1 et même peut-être en b2; c'est le cas de la fermeture d'un quartier.

Une telle manoeuvre sera encore favorable à la fois à la lutte contre l'incendie en le privant d'air, et à la stabilisation de l'aéragé dans les branches latérales amont en diminuant R_i tout en augmentant R_i .

On remarquera que si on doit abandonner un barrage tel que bo, ou b1 en cours d'érection, on a intérêt à le laisser aussi étanche que possible : ce sont des résistances dans le circuit principal interne. Mais il faut voir les conséquences d'un barrage en amont aéragé d'une ou plusieurs latérales : si on leur applique la formule fondamentale, on voit que le nouveau barrage se situe, pour elles, dans la zone "externe", il augmente donc R_e et, si l'incendie ne faiblit pas, elles seront très rapidement le siège d'une inversion d'aéragé; si l'inversion avait déjà eu lieu, le débit inversé s'accroîtrait. Ce phénomène est très classique; la théorie de Budryk en précise bien les conditions.

Les conséquences de cette inversion ou de son accélération sont importantes.

- a) Elle ramène des fumées d'incendie sur l'entrée d'air du feu, d'où risque d'explosion même en mine non grisouteuse et ce risque sera d'autant plus grand que le volume intéressé sera plus grand.
- b) Si la branche par laquelle se fait le retour (BoAo sur la fig. 5) est fermée par une porte ou un barrage, R_i s'en trouve diminué, ce qui n'est pas favorable à la stabilité des branches telles que A1 B1, A2 B2, etc... (voir ci-dessus).

De plus, le freinage s'oppose au brassage des fumées, circonstance qui paraît bien accroître le risque d'explosion plutôt que de le réduire.

En tout état de cause, il apparaît que s'il y a des portes dans les branches inversées, il vaut mieux les ouvrir, si on le peut, que les fermer; dans tous les cas on devra s'abstenir d'y construire des barrages.

Cette proposition, qui n'est pas du tout évidente a priori, est un enseignement précis de la théorie de Budryk.

En résumé, lorsque l'on doit barrer un ensemble de galeries (un ou plusieurs quartiers), on procédera toujours :

- en barrant le circuit principal aussi près que possible du foyer d'incendie
- en ouvrant les latérales situées en aval-aérage du barrage fondamental établi dans le circuit principal.

Plus étanches seront les barrages sur le circuit principal, plus grand sera R_i . Plus ouvertes seront les latérales situées au-delà des barrages, plus grand sera R_i , et mieux sera assurée la stabilité des branches conservées.

Même en mine non grisouteuse on ne devra pas exclure a priori la possibilité d'une explosion des gaz d'incendie.

B) Cas des mines grisouteuses

Le principe généralement admis en mine grisouteuse est de ne construire que des barrages suffisamment solides pour résister à une explosion éventuelle; de construire de tels barrages simultanément sur les entrées et sur les retours d'air, en prenant soin de maintenir un aérage suffisant de la partie à barrer pendant toute la durée de la construction des barrages, et de procéder simultanément à la fermeture des entrées et des retours d'air lorsque tous les barrages sont terminés.

Une conséquence de cette technique extrêmement lourde est qu'il faut prévoir l'écoulement d'un délai assez long jusqu'à la fermeture effective des barrages; comme d'autre part ceux-ci doivent être placés en terrain résistant et peu fissuré, on est amené dans la plupart des cas, à prendre du recul par rapport à l'incendie et à abandonner entre barrages des zones relativement étendues et comportant souvent des galeries en parallèle : ce sera alors le cas appelé ci-dessus barrage de quartier.

La construction des barrages constituant toujours un étranglement pour l'aéragé, et rien n'empêchant le développement de l'incendie, on voit que, toutes les fois que l'on endiguera une ou plusieurs latérales à la galerie incendiée, on réalisera précisément les conditions favorisant une diminution du débit dans ces latérales, puis arrêt et inversion d'aéragé, celle-ci se produisant au moment de la fermeture des barrages.

Il semble donc bien, à la réflexion, que ce soit dans ce phénomène que réside le véritable danger d'explosion en cas d'incendie en mine grisouteuse.

Comme on n'a encore aucun moyen d'éviter ce phénomène, que la théorie de Budryk permet de comprendre, on devra donc s'efforcer aussi bien en mine grisouteuse qu'en mine non grisouteuse, de prendre aussi rapidement que possible la seule mesure susceptible d'empêcher le développement de l'incendie et d'éviter des arrêts d'aéragé dans les latérales sans présenter aucun risque, qui est de freiner l'aéragé sur l'entrée d'air de l'incendie (1).

En mine grisouteuse et en l'absence d'analyse des fumées non diluées on veillera en première urgence à ne pas réduire l'aéragé sensiblement au-dessous de son débit normal.

En ce qui concerne les autres manoeuvres à exécuter sur l'aéragé au voisinage de la galerie incendiée, les conclusions tirées pour les mines non grisouteuses restent bien entendu valables : s'en abstenir formellement sans que leurs conséquences aient été examinées à fond.

1) D'après un doc. de travail (n° 674/66 du 31.1.66
Traduction d'un article d'origine russe: Influence
de la vitesse de l'air sur la propagation d'un
incendie.

2 - Opérations sur l'aérage général

Mines grisouteuses et mines non grisouteuses

Concurremment avec les mesures ou manoeuvres décrites ci-dessus, qui font pratiquement partie de la lutte directe contre le feu, et sont prises dans le voisinage de la galerie incendiée, on pourra aussi agir sur les autres éléments qui permettent d'assurer la stabilité de l'aérage dans la branche choisie (AB de la fig. 4 ou $A_0B_0 - A_1B_1 - A_2B_2$ de la fig. 5).

a) Action sur hem

La formule fondamentale montre que l'on a intérêt à avoir hem aussi grand que possible.

Or, on a vu que hem est la valeur moyenne pondérée des forces aéromotrices des sources qui agissent sur les filets du demi-champ externe de la branche AB à stabiliser.

Il en résulte qu'il y aura intérêt à veiller avec soin à ce que les ventilateurs qui sont facteurs de hem (p. ex. ventilateur V_2 dans le cas de la fig. 2 du présent chapitre et V_1 dans le cas de la fig. 3) ne s'arrêtent pas, et même, le cas échéant, à augmenter leur force aéromotrice.

Cette augmentation serait possible par exemple avec des ventilateurs à pales réglables en marche et à condition de tenir compte des modifications apportées par ailleurs au réseau d'aérage (arrêt de certains ventilateurs auxiliaires, barrage de la branche incendiée, etc...) pour se placer dans la zone de fonctionnement la plus favorable, ce qui implique une bonne connaissance des caractéristiques des ventilateurs.

On retiendra essentiellement que tout arrêt de ces ventilateurs, volontaire ou accidentel, pourrait avoir pour effet des inversions d'aérage quasi immédiates.

Par contre, en ce qui concerne les ventilateurs qui n'interviennent pas dans la détermination de hem (par exemple ventilateur V1 de la fig. 2 du présent chapitre, V2 et V3 de la fig. 3), leur arrêt éventuel, préconisé par ailleurs pour assurer la stabilité de structure, ne risque pas par son action sur hem de compromettre la stabilité de la branche AB eu égard à l'incendie.

Cet arrêt, lorsqu'il sera possible, sera même en général favorable à cette stabilité, car il contribuera à la diminution de R_e (voir b.4 ci-après) par élimination des champs de filets qui les concernent.

b) Action sur R_e

Alors que la stabilisation dans la branche AB exigeait que l'on agisse sur R_i en l'augmentant, on a vu comment il faudra au contraire diminuer R_e autant que de besoin: il y a pour cela deux façons de faire :

- 1 - Réduire les résistances du circuit principal (ouverture de portes, dégagement, etc...) jusqu'aux extrémités de la branche latérale choisie pour être stabilisée, et ceci aussi bien côté entrée d'air que côté retour d'air.

Le tracé du circuit principal est facile à reconnaître : c'est, d'une part, l'entrée d'air jusqu'au foyer, d'autre part, le trajet des fumées jusqu'à la sortie.

- 2 - Augmenter les résistances des branches latérales (fermeture de portes, toiles tendues etc...). Ces branches sont aussi faciles à reconnaître que le circuit principal : c'est tout ce qui en diverge côté entrée d'air et tout ce qui y converge côté retour d'air. Rappelons que la branche à stabiliser fait partie des branches latérales côté "extérieur". On peut donc avoir intérêt à y freiner l'aéragé, si elle n'est pas très voisine du foyer d'incendie (1). L'action sur les latérales à grand débit sera évidemment plus efficace que l'action sur les latérales à faible débit .

1) Voir la) ci-dessus : Barrage de la galerie voisine de l'incendie.

Il y a une restriction à faire en ce qui concerne les branches latérales qui forment "pont" entre les deux sous-réseaux (extérieur et intérieur): il est impossible de savoir a priori si la fermeture d'un tel pont favorisera ou défavorisera la stabilité dans la branche AB car les ponts sont des branches latérales qui appartiennent à la fois aux deux sous-réseaux.

Mais, en fait, le procédé qui consisterait à augmenter un débit étranger dans le circuit "interne" (côté feu) pour augmenter R_i est trop aléatoire pour pouvoir être pris en considération; l'efficacité d'un tel moyen serait d'ailleurs négligeable par rapport à celle du moindre frein d'aéragé apposé dans le circuit principal de l'incendie, et en particulier dans la galerie incendiée; par ailleurs il est évident que l'on devra éviter avec soin d'envoyer de l'air frais vers les fumées chaudes de l'incendie, susceptibles de brûler ou d'exploser au contact d'air frais.

En conclusion, sauf cas exceptionnel, les latérales "ponts" partant de l'entrée d'air et conduisant dans la zone de l'incendie devront être examinées d'urgence pour faire l'objet d'une fermeture plus ou moins complète, le cas échéant d'un barrage étanche.

L'action sur les résistances des branches latérales et éventuellement sur les ventilateurs qui y existent, appelle des remarques importantes :

1- Diminuer R_e et augmenter h_e conduit toujours à augmenter le potentiel aéromoteur du point A par rapport à celui du point B. (C'est d'ailleurs ce qui assure la stabilité d'aéragé de cette branche). Mais ceci signifie aussi, du même coup, que les mêmes manoeuvres tendront à forcer le débit d'air dans la zone incendiée.

C'est donc seulement si le barrage principal dans l'entrée d'air du foyer est déjà sérieusement assuré que l'on retirera tout le bénéfice attendu des manoeuvres sur R_e et h_e .

De telles manoeuvres ne devront donc pas être exécutées indépendamment des opérations de lutte directe contre l'incendie.

- 2 - Certaines des branches sur lesquelles on agit peuvent appartenir à une "maille" : une modification de leur résistance est donc susceptible de provoquer des perturbations inattendues dans une branche voisine frappée d'instabilité du 1er ordre (diagonale).

Donc, si la règle de base est simple et claire et applicable sans aucun risque dans un réseau simplement ramifié, il n'en est pas de même dans des réseaux maillés.

Il sera donc nécessaire de bien connaître la structure du réseau dans ses grandes lignes et dans ses détails.

- 3 - L'action sur les résistances déplace le point de fonctionnement du ou des ventilateurs sur leurs courbes caractéristiques, ce qui risque de provoquer des perturbations graves, en particulier des "pompages" si l'on augmente trop la résistance globale du réseau correspondant.

Il est donc nécessaire de connaître les courbes caractéristiques du ou des ventilateurs et de surveiller constamment leurs conditions de fonctionnement pendant l'action contre l'incendie.

- 4 - La marche des ventilateurs qui n'interviennent pas dans hem (ventilateurs auxiliaires des autres quartiers) a déjà été trouvée néfaste en ce qui concerne la stabilité du circuit principal du feu.

La marche de ces ventilateurs agit, en outre, directement sur la valeur de R_e par l'intermédiaire du débit qu'elles font circuler dans la zone externe du circuit principal de l'incendie; on aura donc, à ce nouveau point de vue, intérêt à réduire leur activité, le cas échéant à les arrêter, jamais à les forcer.

Exemple d'application

A titre d'exemple d'application, reprenons l'étude de la catastrophe du puits Combes, relatée à l'Annexe I.

Dans une première phase, le foyer d'incendie se trouvant juste en aval du 12e niveau dans le 1er plan Est, son action aéromotrice devait se faire sentir dans la partie supérieure du plan, c'est-à-dire dans la branche 4-8.

Le schéma Budryk "fermé" correspondant est celui de la fig. 3 du chapitre II, où V2 représente l'effet aéromoteur de l'incendie.

Le barrage disposé rapidement par la surveillance sur l'entrée d'air du foyer était donc une bonne manoeuvre, mais elle n'a pas empêché les inversions d'aérage catastrophiques vers les quartiers occupés.

Elle n'était, en effet, que l'une des manoeuvres qu'indique la théorie de Budryk :

- a) Le "pont" la-4 (remonte Ouest) apportait de l'air si près du foyer qu'il l'alimentait certainement. A ce titre, un barrage de cette voie ne pouvait être que bénéfique.
- b) Ce "pont" était aussi, dans une certaine mesure, une latérale du sous-réseau extérieur, à ce titre on avait intérêt à le barrer.
- c) Bien que l'on n'ait aucun renseignement sur les conditions respectives d'aérage dans le quartier sinistré et dans les quartiers Ouest et de la Couche Chana, il est absolument certain que le freinage de l'air vers ces quartiers ne pouvait qu'empêcher l'inversion d'aérage qui s'est produite; il est même probable que c'eût été le moyen le plus puissant dont on disposait.

Dans la deuxième phase, il est probable que le feu a progressé vers la base du 1er plan Est, si bien que l'effet aéromoteur s'est manifesté de plus en plus

dans la branche 3-4 (fig. 4 du chapitre II) ce qui explique très clairement l'inversion dans la branche la-4, ramenant des fumées sur l'entrée d'air du foyer et des autres chantiers.

Sur ce schéma, nous retrouvons ici l'intérêt qu'il y aurait eu à freiner l'air dans cette artère pour la stabiliser.

Dans cette situation, comme dans la précédente, le freinage énergique des circuits d'air des autres quartiers : couche Chana et Ouest aurait probablement sauvé la situation.

CAS DE L'AERAGE DESCENDANT

Nous avons vu au chapitre précédent que Budryk n'a pas donné de règles pratiques de stabilisation de l'aéragé pour un incendie prenant naissance en aéragé descendant, en raison de l'instabilité immédiate qui frappe la galerie elle-même où a lieu l'incendie et qui rend pratiquement impossible toute attaque directe de cet incendie.

A défaut de règles pratiques de stabilisation les Polonais préconisent les mesures préventives suivantes pour les galeries en aéragé descendant :

- a) utiliser du soutènement incombustible;
- b) utiliser des câbles électriques, bandes transporteuses, etc... incombustibles;
- c) y proscrire tout dépôt de matières combustibles telles que bois, huiles et graisses, etc.....
- d) creuser un by-pass, normalement fermé mais ouvert en cas de feu, pour détourner les fumées directement vers le puits de retour sans passer par les chantiers (1).

Un cas particulier très important est celui des incendies dans les puits d'entrée d'air: c'est le seul cas avec celui des incendies dans les entrées d'air principales où les Polonais envisagent l'inversion volontaire totale de l'aéragé.

1) Annales des Mines de Belgique, 4e livraison, p. 447 et suivantes - avril 1963 -

A cet effet, ils ont à l'étude des ventilateurs principaux réversibles; l'envoi d'eau en quantités relativement importantes dans les puits de retour d'air, ce qui y réalise une ventilation soufflante, est considéré comme une solution possible.

Ces cas sont considérés comme les plus dangereux et les plus difficiles à traiter.

En conclusion, on voit que si la formule de Budryk a une valeur universelle et fournit des directives simples valables dans tous les cas d'incendies en aérage montant (augmenter R_i , augmenter ou au moins maintenir R_e), son application sur une grande échelle en cas d'incendie important exige une excellente connaissance des conditions de l'aérage (réseau et ventilateurs).

On retiendra principalement que le freinage de l'air sur l'entrée d'air du foyer, si possible dans la branche en feu est toujours une opération favorable, même (et peut-être surtout) en mine grisouteuse, et que le maintien en activité maximale, sinon renforcée, du ou des ventilateurs aérant le quartier sinistré, est une condition absolue de maintien de la stabilité d'aérage dans ce quartier.

On retiendra ensuite qu'il existe en outre de nombreux moyens d'accroître cette stabilité si celle-ci paraît menacée, mais que leur emploi exige une parfaite connaissance des conditions de l'aérage : structure du réseau et caractéristiques des ventilateurs.

On retiendra enfin que les galeries, voire les quartiers en aérage descendant, posent des problèmes qui n'ont pas de solutions du même genre.

CHAPITRE VI

APPLICATION DE LA THEORIE DE BUDRYK

DANS LES MINES POLONAISES (1)

En raison de la très grande expérience acquise dans les mines polonaises en matière de lutte contre les incendies (on notait 600 incendies de mine par an en Pologne, il y a quelques années), il est certainement intéressant d'examiner comment on y applique la théorie de Budryk, qui est enseignée très à fond dans toutes les académies et écoles des mines.

On y considère tout d'abord que, pour pouvoir agir vite sur l'aérage en cas d'urgence, il est nécessaire d'avoir une connaissance aussi parfaite que possible des conditions de cet aérage.

A cet effet, on établit dans toutes les mines polonaises avec la collaboration des universités, à partir des plans topographiques :

- des plans perspectifs généraux ;
- des schémas canoniques d'ensemble et, si nécessaire, des schémas partiels pour les quartiers compliqués;
- des schémas "Bystron" dans de nombreux cas.

Les schémas canoniques sont habillés des renseignements nécessaires à l'étude des perturbations susceptibles d'être provoquées par un incendie survenant en n'importe quel point de la mine, et en particulier :

- Sens d'inclinaison des branches pentées, avec indication de leur longueur et de leur dénivellation;
- Débits, teneur en grisou et température de l'air, au moins dans les branches principales;

1) Voir Doc. 453/2/65 Compte-rendu sur le voyage du Groupe d'experts en Pologne.

- Trajets et si possible débits des fuites par les vieux travaux;
- Position de toutes les portes (de réglage ou "de stabilisation") ainsi que des barrages existants, des stations de mesure, etc...
- Tous les noeuds et toutes les portes sont numérotés, les mêmes numéros étant reportés sur le plan topographique et sur le plan perspectif, ceci afin d'éviter toute erreur d'identification.

Ces schémas, constamment tenus à jour, font l'objet d'études systématiques par des étudiants de l'Académie des Mines à titre de travaux pratiques, et par les ingénieurs des sièges.

Ces études permettent de découvrir les anomalies du réseau et d'étudier systématiquement les répercussions possibles d'incendies qui prendraient naissance en un point quelconque de la mine. On détermine ainsi a priori les mesures à prendre pour améliorer la stabilité du réseau, ainsi que les dispositions à prendre d'urgence en cas d'incendie: chantiers à faire évacuer, manoeuvres de portes à exécuter, pour le cas où l'incendie ne pourrait pas être maîtrisé rapidement et se développerait dangereusement, etc....

Tous ces renseignements sont consignés dans des dossiers faciles à consulter en cas de nécessité, quelquefois même enregistrés sur bandes magnétiques, et constamment tenus à jour au cours d'exercices en chambre qui réunissent à intervalles fixes (en principe trimestriels) ingénieurs et porions sous la direction du chef de siège.

En second lieu, des dispositions pratiques, pour la plupart exigées par le règlement, sont prises en ce qui concerne les emplacements des portes régulatrices d'aérage et des portes dites "de stabilisation" à fermer en cas d'incendie.

C'est ainsi que, sauf dérogations accordées dans des cas spéciaux, les portes régulatrices d'aérage sont placées uniquement dans les courants d'air

dits indépendants (1) et uniquement côté entrée d'air, pour rester accessibles en cas d'incendies. Lorsque la disposition des lieux oblige à placer ces portes sur les retours d'air, elles doivent être à moins de 15 mètres d'un confluent d'aéragage pour rester relativement accessibles à partir d'un courant d'air frais, en cas d'incendie.

Des portes dites "de stabilisation" en cas d'incendie, qui restent normalement ouvertes, sont installées :

- a) Sur toutes les entrées et tous les retours d'air des courants "indépendants".
- b) A toutes les bifurcations du courant d'entrée d'air, immédiatement après chaque bifurcation : ces portes sont obligatoirement métalliques et leurs cadres en maçonnerie. Les trappes de tête de puits et les portes d'accrochages appartiennent à ce type de porte; ces portes commandent donc des entrées d'air communes à plusieurs chantiers, elles sont dites "portes de groupe".
- c) Aux deux extrémités des galeries dites "dépendantes", c'est-à-dire reliant deux entrées d'air ou deux retours d'air (d'une façon générale, les branches diagonales ne sont tolérées que si elles sont indispensables).

Les numéros d'identification de toutes ces portes sont inscrits en gros chiffres et en relief sur les bâtis maçonnés; ils sont, comme on l'a vu, reportés sur tous les plans et schémas.

Ces portes sont destinées à opérer les manoeuvres de stabilisation de l'aéragage en cas d'incendie, en application de la théorie de Budryk.

1) Un courant "indépendant" est un courant qui ne se divise plus. Les chantiers sont aérés par des courants indépendants.

Lorsqu'un incendie éclate au fond, le règlement polonais prescrit en son article 930 par. 3, outre l'obligation de tenter de l'éteindre par tous les moyens et de donner l'alerte le plus vite possible : "quiconque constate du feu dans un chantier est tenu de fermer la porte de stabilisation établie sur l'entrée d'air de ce chantier ..." C'est l'application stricte de la théorie de Budryk.

En fait, les praticiens estiment qu'il est impossible de laisser une aussi lourde responsabilité à n'importe qui, en raison des erreurs ou confusions possibles et qu'aucune manoeuvre de porte ne doit être opérée, même en mine non grisouteuse, sans l'intervention d'un membre de la surveillance.

La consigne pratique est la suivante :

En cas d'incendie, même apparemment bénin, la surveillance du chantier, la direction du siège et les équipes de sauvetage (1) sont alertées dans les plus brefs délais possibles (2); le premier agent de la surveillance prévenu doit, après avoir fait retirer le personnel menacé, fermer ou faire fermer la porte de stabilisation du courant indépendant correspondant (et aucune autre). Si cette porte n'existe pas, ou ne peut pas être fermée pour une raison quelconque, l'arrivée d'air sur le foyer doit être freinée par tous les moyens possibles, au besoin en obturant la galerie avec des vêtements. C'est la seule mesure relative à l'aérage qui peut et doit être prise à l'initiative du personnel du fond (mais surveillance seulement).

L'équipe de sauvetage se rend immédiatement dans le quartier incendié pendant que le chef de siège (ou en son absence l'ingénieur du grade le plus élevé) et l'ingénieur d'aérage se rendent impérativement au bureau du siège où ils prennent la direction des opérations.

-
- 1) Les sièges à feux d'une certaine importance ont une équipe en permanence de sauvetage, au jour; d'autres permanences existent au niveau "Secteur" (2 équipes) et à l'échelon national (Bytom).
 - 2) De très nombreuses liaisons par téléphone et par radio existent entre les sièges, les secteurs et la section centrale de sauvetage de Bytom.

Le "poste de commandement" dispose de liaisons nombreuses avec le fond, telles que sirènes d'alarme et le cas échéant haut-parleurs installés dans les galeries principales à proximité des chantiers pour en obtenir l'évacuation rapide en cas de nécessité.

Dans les sièges les plus modernes, il y a même des télécommandes pour la manoeuvre des portes de stabilisation ou de sécurité les plus importantes, et des télévigiles renseignent en permanence le chef des opérations sur le débit d'air, la température, la teneur en grisou et en oxyde de carbone des principaux retours d'air, sur la position des portes, la marche des ventilateurs, etc.....

Toutes les informations venues du fond, y compris les informations téléphoniques, ainsi que tous les ordres donnés doivent être enregistrés, par écrit ou sur magnétophone, dans le but de permettre la reconstitution complète des faits en vue d'une critique constructive ultérieure.

Tout ceci matérialise bien à la fois la complexité inhérente à toute action sur l'aérage et l'importance capitale que les Polonais lui accordent.

Dans tous les cas, la théorie de Budryk est considérée comme un instrument indispensable à la conduite correcte de la lutte contre les incendies du fond, car c'est elle qui permet de "garder le contact" le plus longtemps avec le foyer pour le maîtriser, ou de prévoir ses effets pour y parer.

CONCLUSION GENERALE

Pour permettre un exposé complet et cohérent de la théorie du Professeur Budryk, que les experts ne connaissaient que par des traductions de documents fragmentaires, il a été nécessaire de rassembler les connaissances éparses dans le domaine de la stabilité de l'aéragé des mines, d'en préciser les notions et d'en faire la synthèse.

Ceci montre à quel point les lois qui régissent l'aéragé des mines sont complexes et encore mal assimilées dans la pratique et combien sont peu évidentes les solutions aux problèmes d'aéragé qui sont pourtant, dans toutes les mines, des problèmes de "tous les jours".

Le très grand intérêt de la théorie de Budryk est précisément d'aboutir à des règles d'action relativement simples, en tous cas extrêmement claires et logiques, donc faciles à retenir, pour assurer la stabilité de l'aéragé en cas d'incendie.

Les représentations schématiques, originales des réseaux d'aéragé, proposées par le Professeur Budryk, apportent une contribution importante à l'étude de l'aéragé.

L'élément principal de la théorie de Budryk est la formule fondamentale, qui régit les conditions de stabilité de l'aéragé dans une galerie donnée, proche ou lointaine d'un incendie, dont les effets se manifestent dans une galerie en aéragé ascendant.

Le groupe d'experts a établi la validité de cette formule fondamentale dans les cas des réseaux maillés comportant un nombre quelconque de sources aéromotrices et en a précisé le contenu; elle permet, de comprendre le phénomène et partant de dégager les règles pratiques à appliquer pour assurer la stabilité de l'aéragé.

L'étude originale, due aux experts du groupe, et concernant l'influence de l'incendie lui-même sur l'écoulement des fumées, a montré que l'effet perturbateur global d'un incendie ne serait (1) pas indéfiniment croissant avec la température du foyer, mais passerait par un maximum pour une température moyenne des fumées relativement basse.

Cette constatation confère un intérêt accru à la théorie de Budryk, en permettant d'une part, de prévoir a priori les conséquences maximales possibles d'un incendie se développant dans une galerie donnée de la mine, quant au risque d'inversion d'aéragé, et de déterminer d'autre part a priori les mesures à prendre pour éviter l'inversion dans telle ou telle galerie effectivement menacée par ce risque.

Mais malheureusement, si la théorie de Budryk permet d'aboutir à une solution pratique intéressante en aéragé montant, il n'en est pas de même lorsque les incendies développent leurs effets en aéragé descendant, ou en ce qui concerne d'autres risques tels que :

- la régression des fumées au moment de l'éclosion d'un incendie, lorsqu'elle est brutale,
- le risque d'explosion, particulièrement en mine grisouteuse, pendant l'érection ou au moment de la fermeture des barrages d'endiguement; lorsque l'endiguement intéresse plusieurs galeries, ou une taille et une arrière-taille.

Dans ce dernier cas, la théorie de Budryk fournit une explication de ce risque d'explosion, mais n'apporte pas de solution pour l'éviter.

Enfin, à l'occasion de cette étude, les problèmes de l'instabilité des diagonales ont été abordés, mais leur examen, qui sort du sujet traité, n'a pas été terminé.

1) La vérification expérimentale du phénomène n'a pas encore été faite.

Il reste donc énormément à faire dans le domaine des problèmes de l'instabilité de l'aéragé, en liaison ou non avec la lutte contre les feux et incendies, et il paraît souhaitable que les pays de la C.E.C.A. continuent à échanger les résultats de leurs découvertes et de leurs expériences, tout en se tenant en permanence au courant des découvertes et des expériences faites dans les autres pays du monde.

ANNEXES

A N N E X E I

MINES DE HOUILLE DE ROCHE-LA-MOLIERE (1)

(Incendie du puits Combes, quarante-huit morts)

Le 30 juin 1928, vers six heures quarante-cinq, des piqueurs qui se rendaient à leurs chantiers virent brûler le garnissage du soutènement du premier plan Est au point F; ils prévinrent un surveillant qui constata l'incendie vers six heures cinquante et fit alerter le gouverneur vers sept heures dix, un tuyauteur qui travaillait au voisinage commença à brancher un tuyau de caoutchouc sur une prise de la conduite d'eau sous pression qui existait à la recette de la tranche en exploitation (deuxième du 12e niveau); faute de joints d'abord, puis le tuyau de caoutchouc étant trop court, à sept heures quarante, l'arrosage du feu n'avait pas encore commencé; le tuyauteur, abandonnant alors son premier projet sur l'ordre du gouverneur, tenta en remontant dans le plan de défaire un joint de la conduite d'eau au voisinage du feu et d'y placer une prise; c'est alors qu'il constata, vers sept heures quarante-cinq, que la colonne d'air comprimé était rompue et que l'air soufflait sur le feu, l'activant considérablement; entre-temps, le gouverneur, vers sept heures trente, ayant vu que le feu s'étendait, avait fait clouer deux toiles, l'une au pied du plan, l'autre 30 à 40 mètres en arrière dans la galerie d'entrée d'air; prévenu, vers sept heures quarante-cinq, que l'air comprimé soufflait sur le feu, il donna l'ordre à un surveillant de faire fermer les vannes des niveaux 330 et 220; la première fut fermée, la seconde ne le fut pas, les ouvriers chargés de cette mission ayant été arrêtés par les fumées à la double porte de 220.

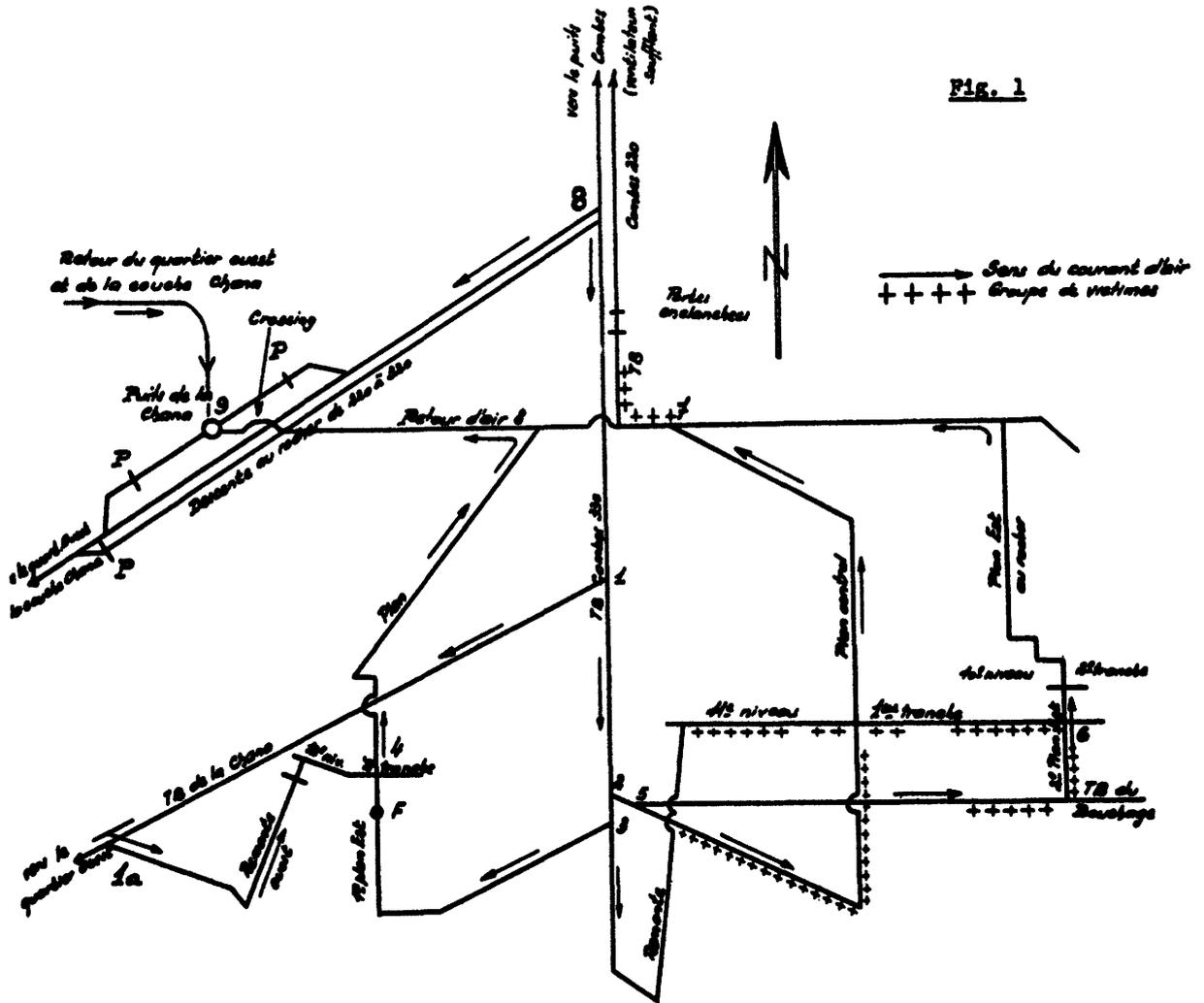
Vers sept heures quarante-cinq, un ouvrier, envoyé par le gouverneur en tête du plan central pour surveiller le remplissage du réservoir d'eau qui alimentait

1) Extrait des "Annales des Mines" Mémoires - Tome VI - 1934
Note de M. BABOIN

la conduite du premier plan Est, vit que les fumées gagnaient la tête de ce plan et commençaient à l'envahir; de même, au deuxième plan Est, vers huit heures, les fumées envahissaient les tranches en exploitation de cette région (première du onzième niveau), éteignant les lampes à flamme; les sous-gouverneurs décidèrent l'évacuation des travaux; l'un d'eux, qui était descendu dans le deuxième plan Est, se heurta dans la galerie qui allait au travers-bancs 330 à la bousculade des ouvriers fuyant affolés et se réfugia à l'avancement des travers-bancs du Bouchage où il ouvrit un souffleur à air comprimé. A huit heures treize, l'ingénieur divisionnaire et l'ingénieur du puits prévenus descendaient et, voulant aller au deuxième plan Est, durent reculer devant les fumées; descendant le plan Central, ils y trouvèrent une vingtaine d'ouvriers évanouis dont ils commencèrent le sauvetage.

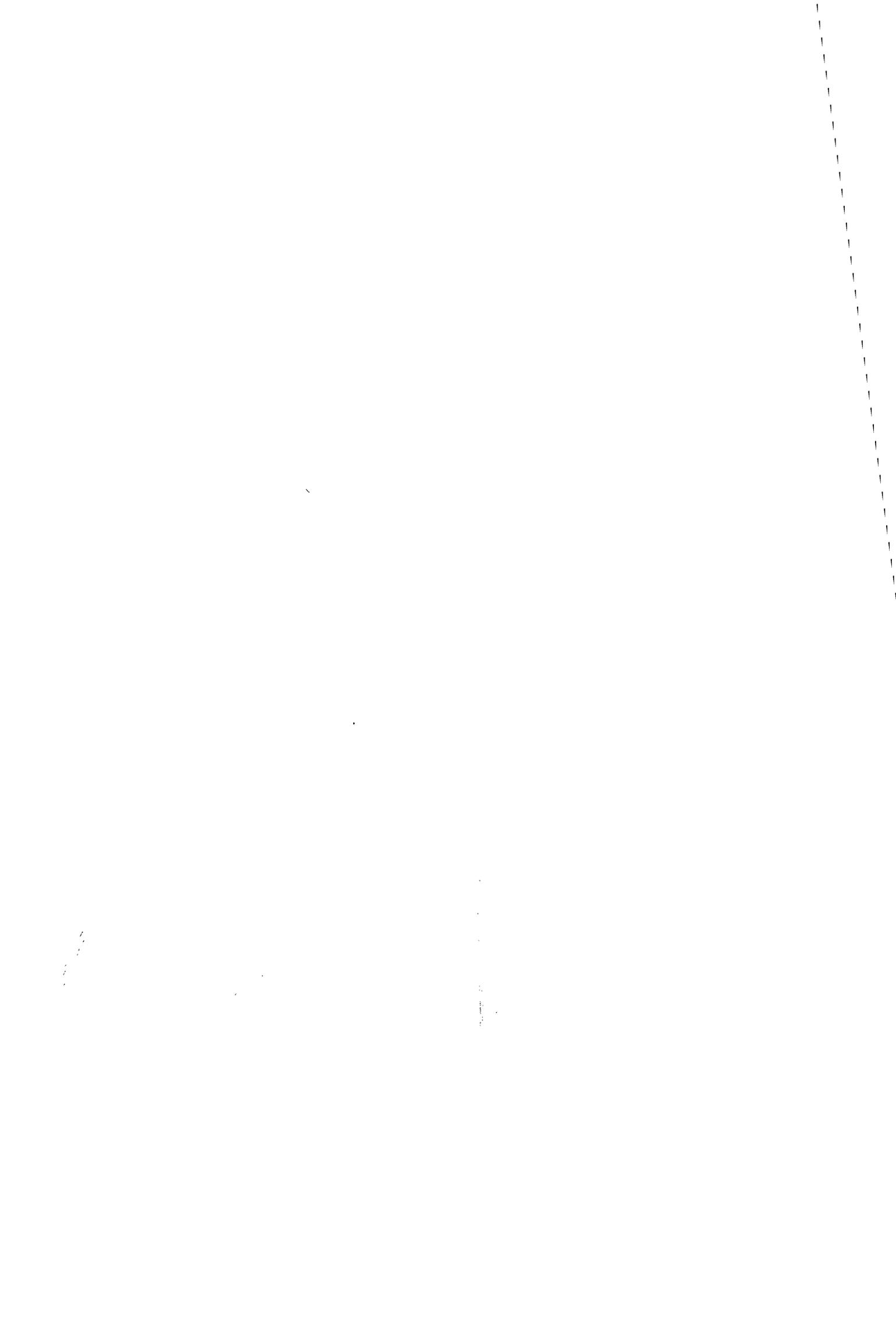
Vers huit heures trente, huit heures quarante, l'aérage normal se rétablit dans le quartier du deuxième plan Est et du plan Central et les fumées s'évacuèrent; mais l'ingénieur divisionnaire en revenant du puits où il était allé chercher du secours, constata, vers huit heures quarante, que les fumées, refoulant du quartier du premier plan Est dans la remonte Ouest et le travers-bancs de la Chana, envahissaient le travers-bancs de 330, entrée d'air du quartier plan Central et deuxième plan Est, où travaillaient au sauvetage l'ingénieur du puits et plusieurs ouvriers.

Vers neuf heures, ce renversement d'aérage cessa, les fumées se dissipèrent à nouveau et le sauvetage put se poursuivre sans difficulté.



Le schéma de l'aéragé permet de suivre les deux renversements successifs, les fumées allant, la première fois, de 8 vers 7, 6 et 5, la seconde fois de 4 vers 1, puis suivant le courant d'air normal, vers 2, 5, 6, 7 et 8.

NOTA : la discussion de ce cas sera reprise, au fur et à mesure de l'exposé de la théorie.



A N N E X E II

EXTRAIT DE L'ANALYSE DE LA CATASTROPHE MINIÈRE SURVENUE

A LA MINE DUKLA DANS LE BASSIN OSTRAU - KARWINE

par Jaromir Tesar et le Dr. Sibor Suchan

Au cours de l'après-midi du 7.7.1961 un grave incendie s'est déclaré dans la mine Dukla et a coûté la vie de 108 personnes. La cause principale de la catastrophe a été l'instabilité de l'aéragé et la méconnaissance de l'influence d'un incendie de mine sur l'aéragé.

L'instabilité de l'aéragé est due au fait que deux quartiers d'aéragé étaient reliés par une voie diagonale dans laquelle s'est produite une inversion du courant d'aéragé par suite de la modification de la résistance provoquée par l'incendie qui s'est déclaré dans les voies d'aéragé du premier quartier touché. En outre, la répartition de la pression dans les deux quartiers d'aéragé, conditionnée par deux ventilateurs principaux, était telle que la pression locale dans la voie d'entrée d'air de l'un des quartiers d'aéragé était approximativement la même que dans la voie de retour d'air de l'autre quartier d'aéragé.

Vous trouverez d'autres détails dans l'exposé susmentionné, qui a paru dans

"Les actualités de la recherche minière" (V.O.)

publié par la société tchèque pour la diffusion des connaissances politiques et techniques à Ostrau, groupe de lecteurs auprès de l'Institut de recherches scientifiques pour le charbon à Ostrau-Radvanice, édition Kreis-Verlag Ostrau, en vue de renseigner les larges couches de la population minière sur les résultats les plus récents de la recherche scientifique et les nouveautés techniques dans les charbonnages nationaux et étrangers.

Imprimé par Tisk 04, Prerov (Prerau)

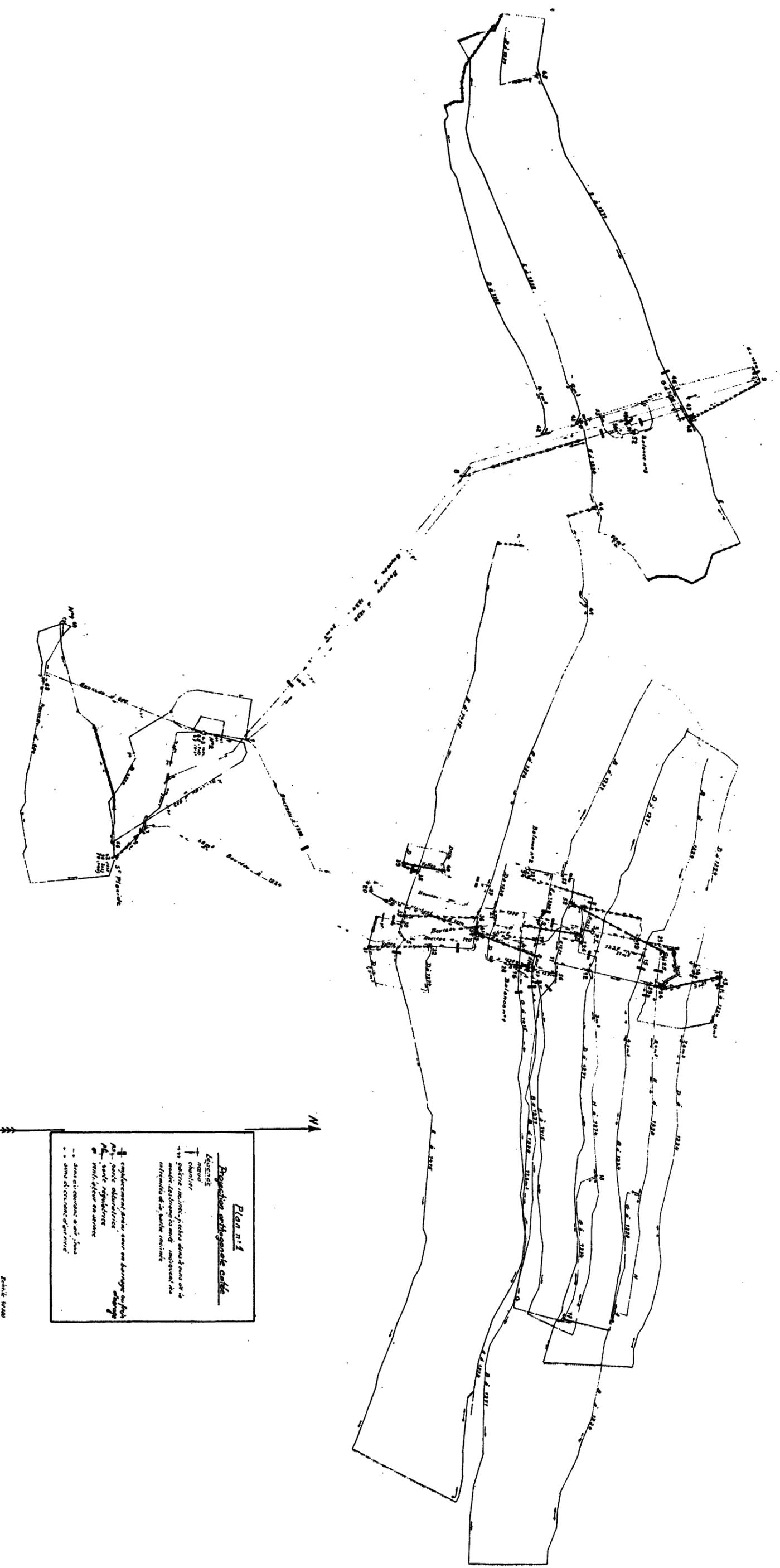
A N N E X E III

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DES FUMÉES SUR L'EFFET
THERMODYNAMIQUE GLOBAL D'UN INCENDIE

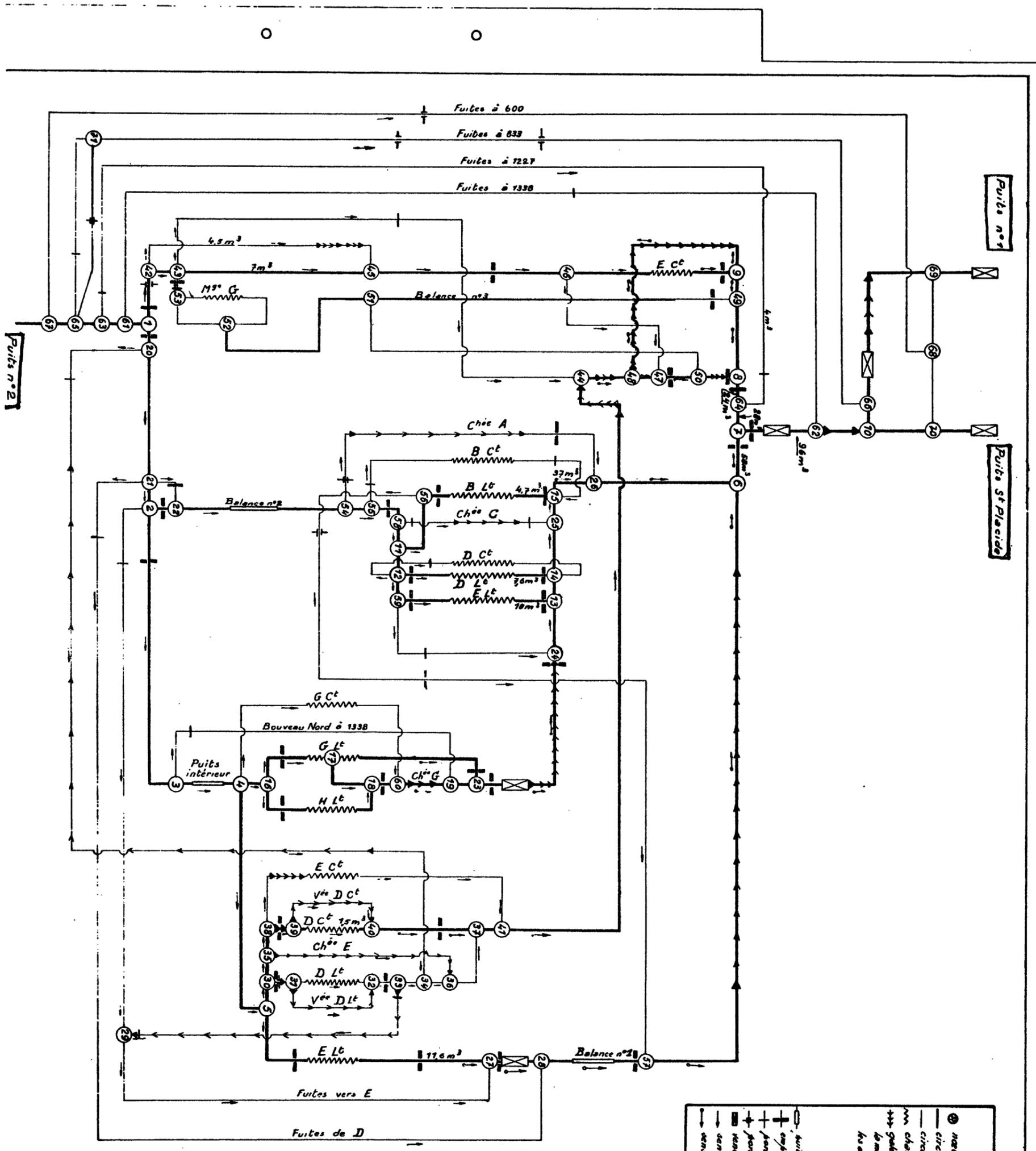
- Sera publiée ultérieurement -

A N N E X E IV

TYPES DIVERS DE REPRESENTATIONS SCHEMATIQUES DU RESEAU
D'AERAGE D'UNE MINE



Plan n° 1
Plan topographique habituel
(Réduction photographique)



Ruis n°1

Ruis Ste Placide

PLAN n°4

Schema Budryk

1^{er} version

Schema d'aerage

Représentation suivant Budryk :

1^{er} version

Legende

— circuit principal

— circuit secondaire

— chantier

+++ galerie inclinée. Niches dans le sens de la marche. Les triangles sont indiqués aux extrémités de la partie inclinée

• puits intérieur

— emplacement pour les fermetures

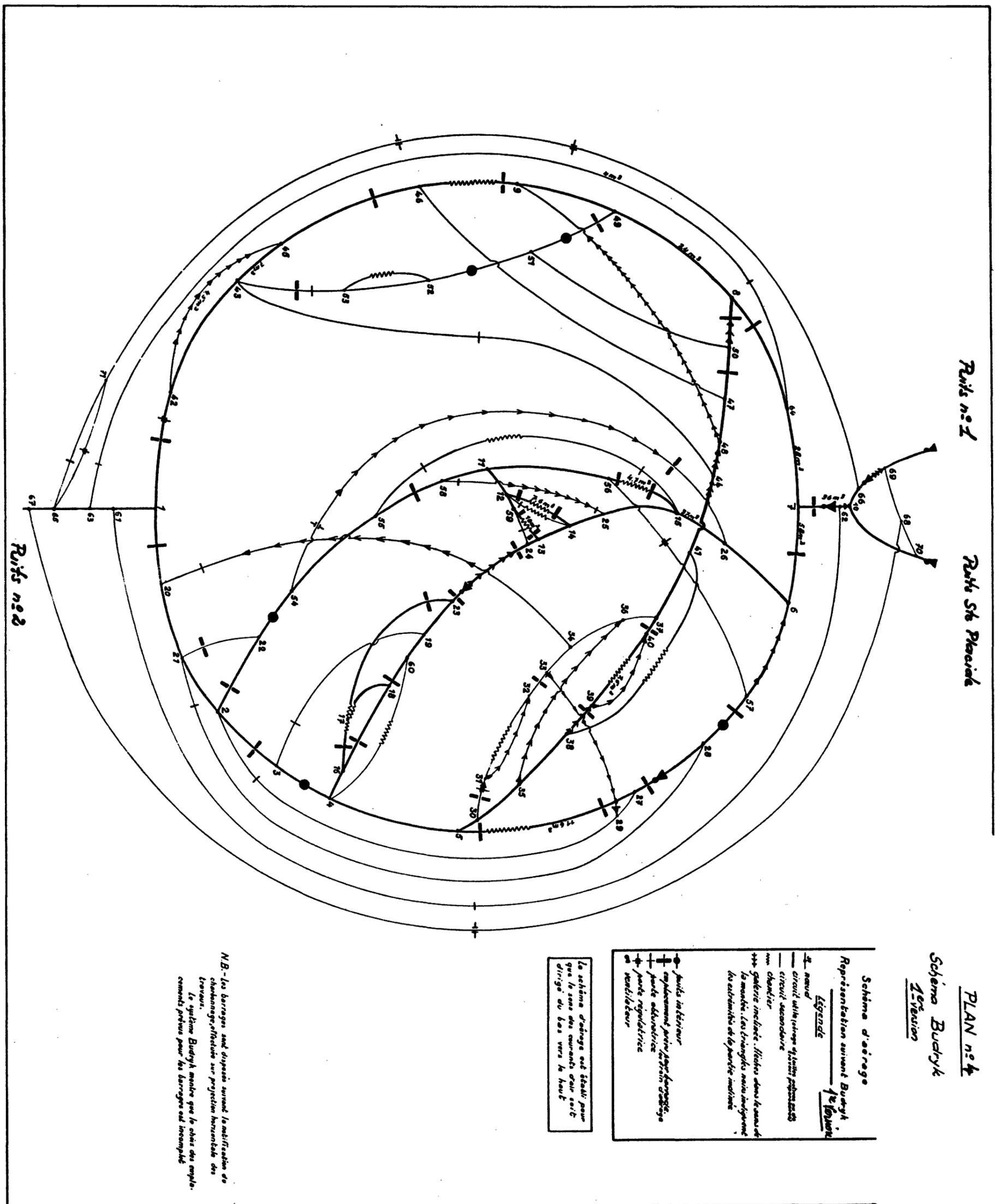
— porte abaisseuse

— porte régulatrice

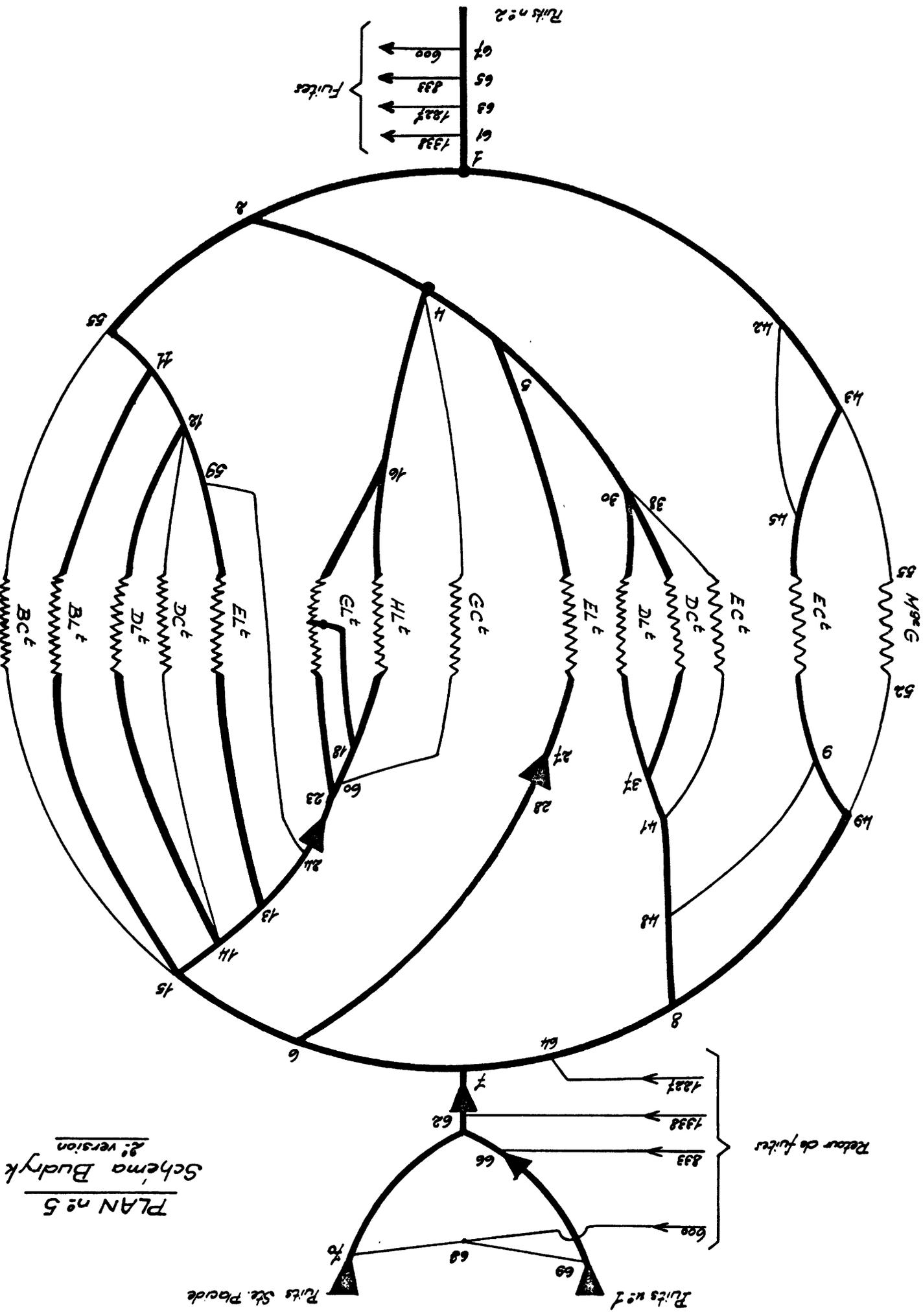
— ventilateur

Le schéma d'aerage est établi pour que le sens des courants d'air soit dirigé du bas vers le haut

N.B. - Les barrages sont disposés suivant la modification de chabannes affectées sur projection horizontale des travaux.
Le système Budryk montre que le choix des emplacements prévus pour les barrages est incomplet



Ruis n°2



PLAN n° 5
 Schema Budryk
 2^e version

A N N E X E V

METHODE PRATIQUE POUR L'ETABLISSEMENT
D'UN SCHEMA CANONIQUE

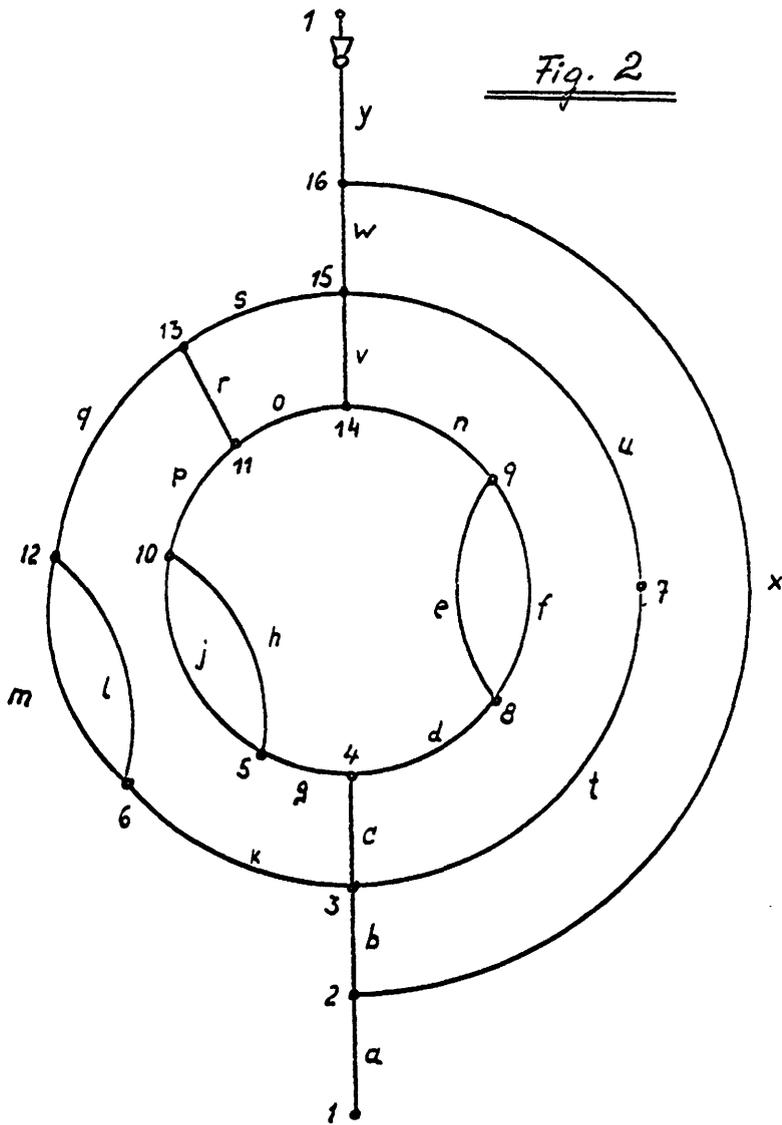
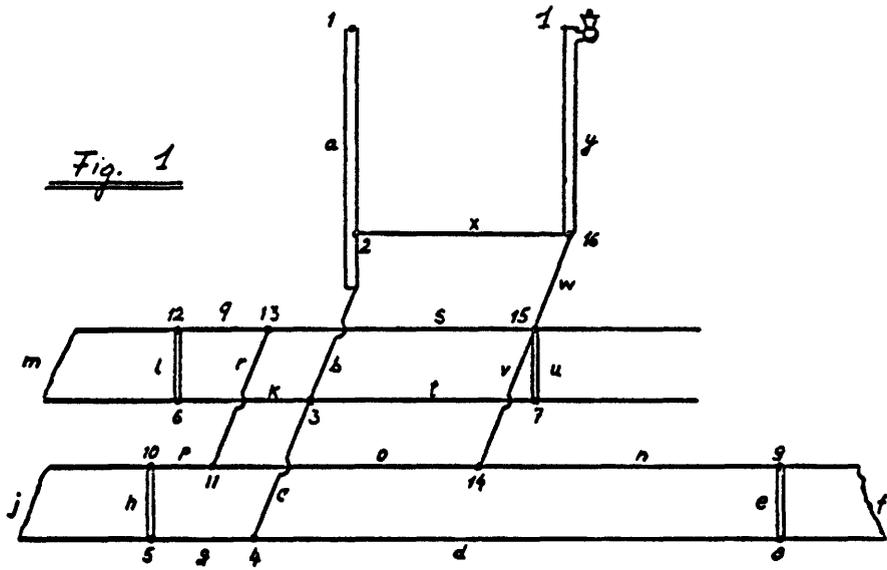
L'établissement d'un "schéma canonique" peut, dans le cas de réseaux complexes, susciter des difficultés de dessin. Pour réduire ces difficultés le procédé suivant est recommandé. Les voies d'aérage d'un réseau d'aérage et les noeuds par lesquels ces voies sont reliées entre elles sont repérés par des lettres et des numéros distincts.

Ces repères sont ensuite reportés dans un tableau de façon que les lignes du tableau indiquent les points de départ et les colonnes, les points terminaux des voies d'aérage. Pour le réseau représenté à la fig. 1 ce tableau se présenterait comme suit :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	a																
2		b														x	
3			c	e	t												
4				g				d									
5									h	j							
6												l	m				
7																u	
8									e	f							
9															r		
10											n						
11													k	o			
12													q				
13																s	
14																v	
15																	y
16	z																

On représente ensuite les voies d'aérage dans l'ordre de leurs noeuds. Dans le cas présent, on commencera par exemple par la voie d'aérage a qui figure à la première ligne et qui va du noeud 1 au noeud 2, on y raccorde les

voies d'aérage figurant à la deuxième ligne c'est-à-dire b, qui va du noeud 2 au noeud 3 et x, qui va du noeud 2 au noeud 16. En général il sera nécessaire de refaire plusieurs fois le schéma ainsi obtenu pour arriver à une présentation adéquate telle que celle de la fig. 2.



A N N E X E VI

EXEMPLE D'INSTABILITE DU PREMIER ORDRE

Mines de houille de Sarre et Moselle (1)

(Feu en veine B, banc inférieur)

Le 22 août 1929 à deux heures, on vit sortir des fumées d'une galerie remblayée en veine B banc inférieur; un feu devait s'être déclaré dans un petit stot de charbon très faillé qu'on avait dû laisser en F.

On entreprit le 22 après-midi, sur le cinquième travers-banc 451 qui était l'entrée d'air du feu, un barrage en béton B 1, d'un mètre d'épaisseur dans lequel on noya trois tuyaux de 94 millimètres et quatre tuyaux de 150 mm qui devaient servir à contrôler la montée du remblai hydraulique et maintenir une entrée d'air tant que les retours d'air ne seraient pas fermés; simultanément, on amena la conduite de remblayage hydraulique par la taille de B banc inférieur jusqu'en tête du montage.

Le 23 au matin, la venue de fumées augmenta dans le cinquième travers-bancs 377 entre les veines A et D; on put cependant monter la colonne de remblayage hydraulique sans appareils respiratoires; à onze heures trente, les flammes sortaient de la galerie du feu, les bois brûlant jusqu'à proximité du travers-bancs; l'incendie fut combattu par arrosage à la lance jusqu'au 24 à dix heures trente.

Dans la nuit du 23, après l'achèvement du barrage B1 et bien que les tuyaux laissés dans le béton ne fussent pas obstrués, l'aérage se renversa : l'air entra par la veine E, étage intermédiaire, la plus grande partie monta à 377 par la taille de veine B banc inférieur, le reste descendit à 451 par le montage en veine B banc inférieur et remonta à 377 par les plans de veine A.

1) Extrait des "Annales des Mines" Mémoires - Tome VI 1934
Note de M. BABOIN

cinquième travers-bancs; pour compléter l'isolement du feu, on construisit en B₂ sur le septième travers-bancs 451 entre les veines A et B un barrage en béton de 1 mètre d'épaisseur derrière lequel l'eau vint s'accumuler faisant tampon étanche; commencé le 25 après midi, il était fini le 26 à six heures. Un deuxième barrage B₃ fut construit en veine B 451, constitué par un mur de pierres sèches jointoyées à l'argile de 7,50 m d'épaisseur, 1,20 m de sable damé et une cloison de béton de 0,60 m; commencé le 26 après midi, il était terminé le 29.

Simultanément, on achevait le remblayage des travaux en veine B banc inférieur après construction du barrage B4 à l'étage intermédiaire et remblayait les travaux et voies de veine A entre 451 et 377; la fumée alors se dissipa à 377.

Enfin, le sable n'étant pas monté en couronne derrière le barrage du cinquième travers-bancs à 451, on compléta le remblayage par une injection de lait de ciment sous pression.

Le 25, deux ouvriers furent intoxiqués dans le puisard du puits de retour d'air où ils travaillaient sans appareils respiratoires malgré les ordres donnés; le 30, des ouvriers et un porion furent intoxiqués en tête de la taille de veine B banc inférieur après la fermeture du barrage.

DISCUSSION

On comprend beaucoup mieux ce qui s'est passé au cours de la lutte contre le feu à l'aide du schéma ouvert du quartier, qui peut être établi selon fig. 2 ci-après.

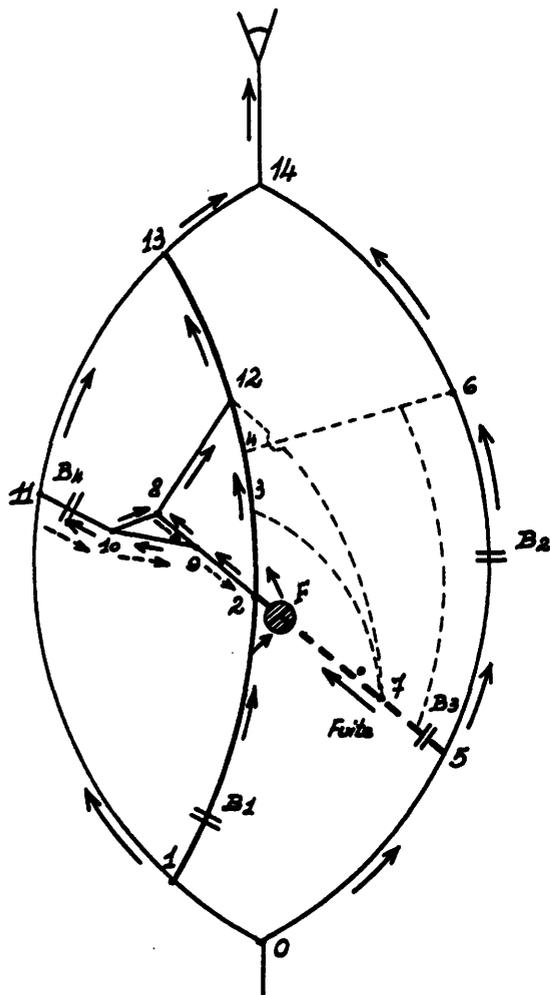


Fig. 2

- Galeries ouvertes
- - - - - Galeries remblayées sans fuites appréciables
- · - · - Galeries remblayées avec fuites
- Sens normal de l'air
- - - - -> Inversion d'aérage

On remarquera d'abord le maillage compliqué du réseau.

Le feu F était probablement alimenté par une fuite d'aérage de 5 vers 2 qui était insoupçonnée et par des fuites à la carrure n° 2. On espérait juguler le feu en le remblayant à travers le montage en veine B sur un barrage construit en B₁.

Mais, la construction du barrage B₁, entre 1 et 2, eut pour effet, en provoquant un abaissement du potentiel du point 2 par suite de l'accroissement de résistance de

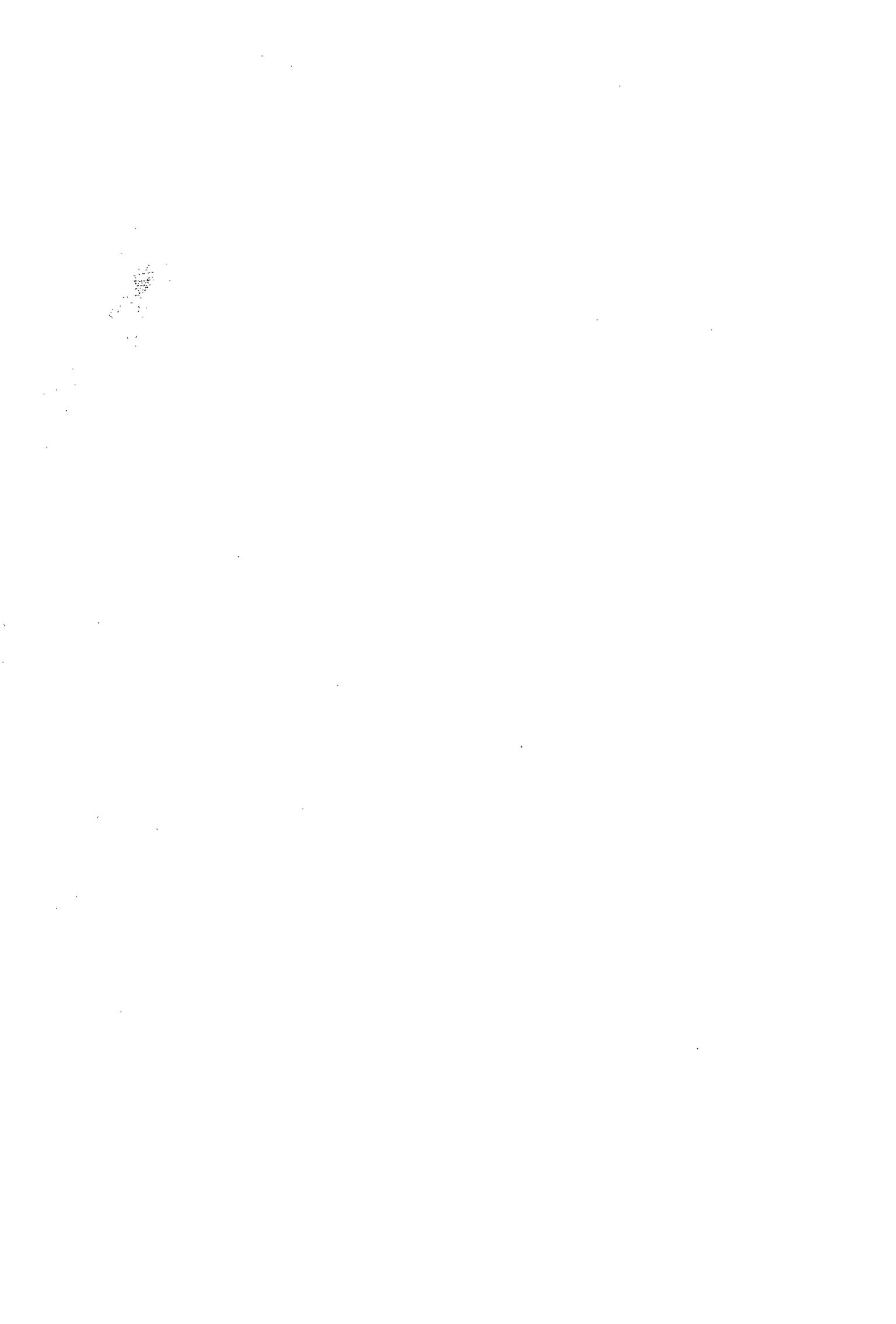
la branche 1-2, d'augmenter le débit de fuite de 5 vers 2, ce qui ne fit qu'attiser le feu.

L'achèvement du barrage ne put qu'accentuer ce phénomène et, de plus, provoquer l'inversion dans les circuits 11-10-9-2 et 8-9, amenant cette fois de l'air frais sur l'incendie qui avait pris naissance à la carrure 2 et était d'autant plus alimenté par la fuite 5-2 que le potentiel du point 2 diminuait encore.

Le remblayage du montage de veine B n'atteignit certainement pas la carrure N° 9 et la fermeture complète du barrage B₁ ne fit qu'accentuer le phénomène.

L'eau de remblayage coulant de veine A dans le 7 T.B. à 451 indiquait une fuite, que le barrage B₂ colmata, mais en aggravant par ailleurs la situation en forçant encore la fuite de 5 vers 2. Les barrages B₃ et B₄ fermaient enfin les arrivées d'air sur le foyer.

Le schéma "canonique" du quartier, portant trace de la "fuite" 5-2 en particulier, aurait permis d'éviter tous ces tâtonnements en rendant possible la prévision des perturbations provoquées par l'érection du barrage B₁.



A N N E X E VII

EXEMPLE D'ETUDE DE STABILITE

Cet exemple a été choisi correspondant à deux cas d'inversion d'aérage inopinée, observés réellement.

Cas A :

Un siège possède 2 puits d'entrée d'air groupés vers le centre de son champ d'exploitation, et reliés entre eux à l'étage inférieur en préparation. A la suite d'un incendie très grave dans un préparatoire de l'étage inférieur, on décide de noyer l'étage et, pour cela, on déverse de l'eau en quantité croissante à la tête de l'un des puits. A un certain moment, le 2e puits d'entrée d'air est le siège d'une inversion d'aérage, remontant les fumées de l'incendie et bloquant ainsi tout accès au fond en air frais.

Cas B :

Un siège de concentration est formé de la réunion de deux mines possédant chacune un puits d'entrée d'air et un puits de retour d'air. Il y a, à l'étage d'entrée d'air, une liaison de roulage pour concentrer l'extraction sur l'un des puits d'entrée d'air. Un jour très froid d'hiver, on place des braseros à la tête du puits d'extraction: la galerie de liaison de roulage est, au bout d'un certain temps, le siège d'un arrêt d'aérage et, peut-être, d'une légère inversion, ce qui provoque une accumulation de grisou. Un locotracteur à trolley provoque l'inflammation du grisou.

Pour étudier ces deux cas, on raisonne sur le schéma général selon Fig. 1 ou A et B sont deux puits d'entrée d'air pour deux champs distincts I et II, aérés chacun par un ventilateur: V_1 et V_2 ;

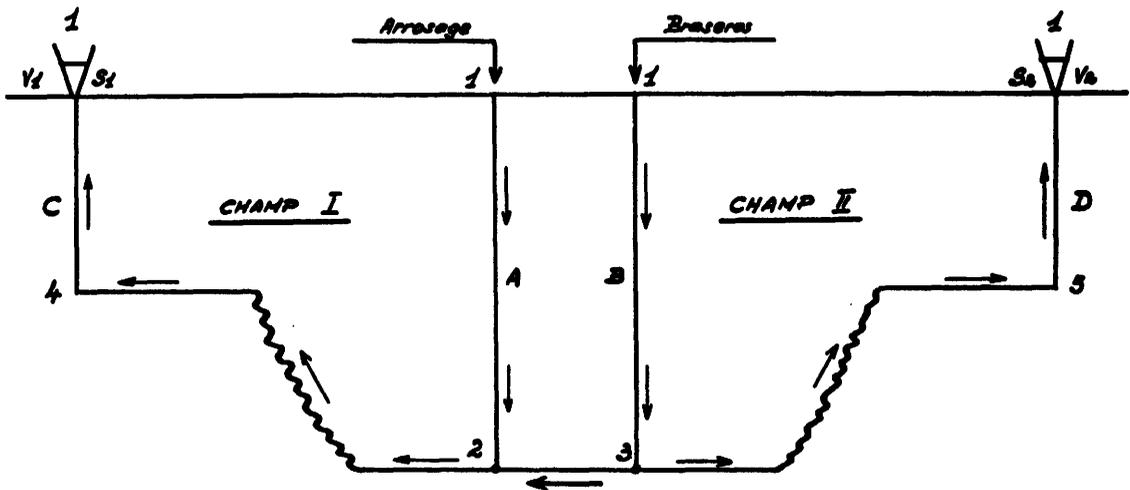


FIG. 1

2-3 est la liaison existant entre les puits à l'étage d'entrée d'air.

Nature des perturbations qui ont provoqué arrêt ou inversion d'aéragé

L'envoi d'eau dans un puits provoque un effet aéro-moteur important soufflant de haut en bas: on pourra donc le représenter par un ventilateur qui serait installé en tête et soufflant dans le puits correspondant.

Le réchauffage de l'air dans l'un des puits d'entrée d'air est équivalent soit à un ventilateur aspirant placé en tête du puits réchauffé soit à un ventilateur soufflant placé en tête du puits non réchauffé. Nous adopterons cette seconde solution, pour traiter d'un seul coup les deux problèmes.

L'aéragé naturel peut être représenté par deux ventilateurs additionnels S_1 et S_2 aux ventilateurs principaux V_1 et V_2 . Il n'introduit donc aucune perturbation à l'aéragé normal, son effet s'ajoutant purement et simplement à celui des ventilateurs normaux.

Etude de stabilité

Il s'agit d'un ensemble complexe soumis à l'action de 3 sources aéromotrices: 2 ventilateurs normaux V_1, V_2 susceptibles d'arrêts ou de dérèglage et 1 source accidentelle v pouvant être soit faible soit puissante.

Schémas Budryk

Le schéma canonique du réseau constitué par l'ensemble des galeries des deux sièges se présente selon Fig. 2.

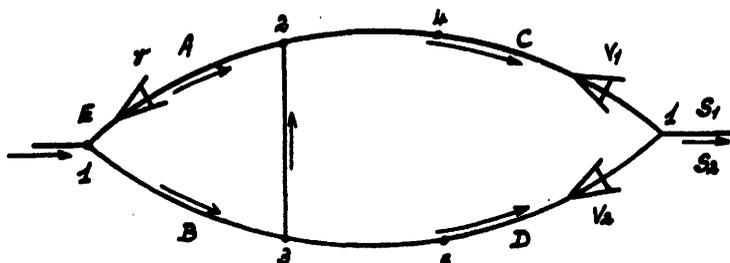


FIG. 2

priée. On peut faire de même pour la perturbation v quand elle existe, voir Fig. 3

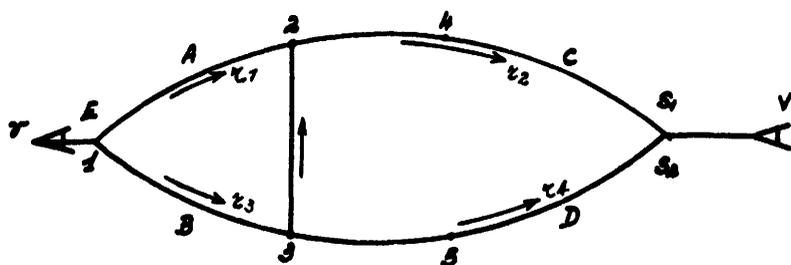


FIG. 3

En première analyse, on peut remplacer les deux ventilateurs V_1 et V_2 par un ventilateur unique V placé sur la sortie commune, la répartition des débits dans les deux branches C et D étant obtenue par adjonction d'une résistance réglable dans la branche approprie.

La branche 2-3 n'est donc pas autre chose qu'une "diagonale" soumise à une instabilité du 1er ordre.

Le sens de circulation de l'air ne dépend, dans le schéma 3, que des valeurs relatives des résistances $r_1 - r_2 - r_3$ et r_4 . Comme ces résistances dépendent des valeurs relatives des forces aéromotrices des ventilateurs V_1 et V_2 et,

le cas échéant, de v , on voit que le sens de circulation de l'air dans la branche 2-3 est déterminé en fonction des valeurs relatives :

- a) des résistances des branches A - B - (2,4,C) et (3, 5 D)
- b) des forces aéromotrices des ventilateurs principaux et, le cas échéant, de la perturbation v.

Comme dans l'exemple B choisi, la branche 2-3 était certainement une branche de faible résistance parcourue par un débit relativement faible, on voit donc qu'elle devait être extrêmement instable, ce qui fut le cas.

Mais si l'artifice employé permet de rendre compte de l'instabilité du premier ordre qui frappe la branche 2-3, il ne permet pas, par contre, de rendre compte des instabilités du 2e ordre qui existent dans ce système du seul fait de la présence de plusieurs sources aéromotrices en activité, simultanées ou non, car il ne permet pas de prendre en compte le phénomène d'inversion, qui est l'évolution au-delà de l'arrêt d'aérage.

Envisageons alors ce qui se passe séparément pour chacune des sources:

1°) V_1 seul : le schéma canonique est le suivant: Fig. 4

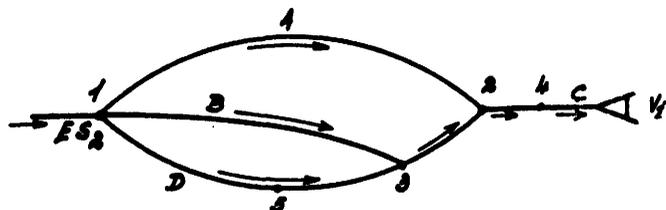


Fig. 4

2°) V_2 seul : Fig. 5

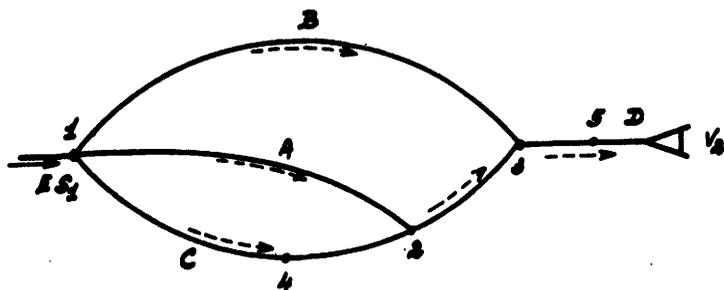


Fig. 5

Aucun des systèmes des figures 4,5 et 6 ne comporte de "diagonale". Tous les sens de circulation d'air sont parfaitement déterminés.

3°) v seul: fig. 6

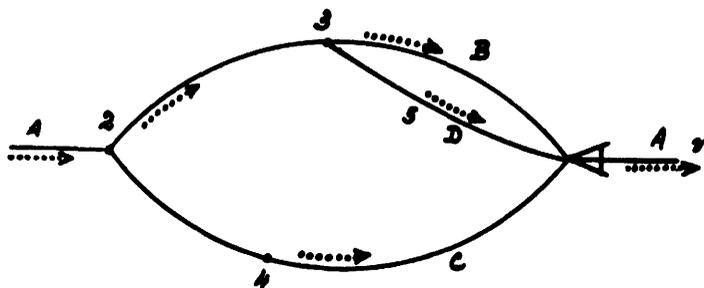


Fig. 6

Pour étudier l'effet combiné des 3 sources, il faut se reporter à un schéma Budryk fermé.

Schéma Budryk fermé

Le schéma qui rend compte de l'effet combiné des différentes sources aéromotrices en présence est le suivant: fig. 7.

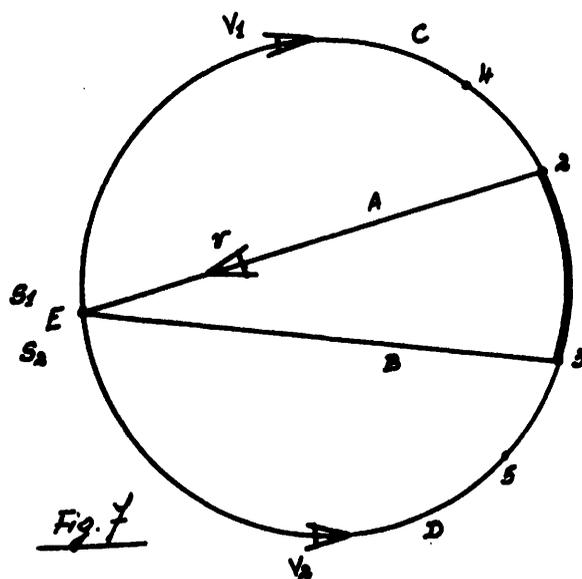


Fig. 7

Nous étudierons successivement:

- a) Les phénomènes possibles en l'absence de perturbation v ,
- b) L'influence d'une perturbation v sur la situation "normale" V_1 et V_2 en activité.

a) Absence de perturbation v :

Le schéma est le suivant: fig. 8, où l'on a indiqué les actions individuelles de V_1 et V_2 , d'après des figures 4 et 5; on voit qu'il s'agit d'un système où les ventilateurs V_1 et V_2 sont en opposition.

Le circuit principal des deux sources en présence est instable: il comprend, en particulier, la branche 2-3.

Seules les branches latérales constituées par les deux puits A et B sont stables.

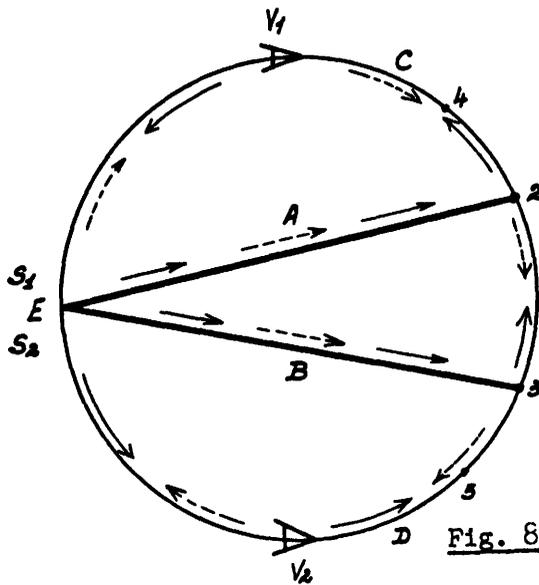


Fig. 8

Dans la branche 2.4 C, en cas d'arrêt du ventilateur V_1 , la ventilation naturelle S_1^1 qui subsiste est opposée à une dépression motrice qui a la même valeur que la perte de charge de la branche A (puits). De ces deux actions antagonistes dépend le sens du courant dans 2.4.C, qui risque donc fort de s'inverser.

De manière identique, dans la branche 3.5.D, en cas d'arrêt du ventilateur V_2 , il y aura, malgré la ventilation naturelle S_2^2 , grand risque d'inversion.

On se trouve donc, dans tous les cas, dans une situation d'instabilité manifeste.

En marche normale des deux ventilateurs $V_1 V_2$, il s'établira des courants francs, sauf toutefois dans la branche 2-3 si les pertes de charge dans A et B sont voisines, ce qui sera souvent le cas, et l'était dans l'exemple B; néanmoins, on réglera les résistances ou les forces aéromotrices V_1 et V_2 pour obtenir un aérage "suffisant" de 3 vers 2 par exemple. Le système résultant est reporté sur la fig. 9.

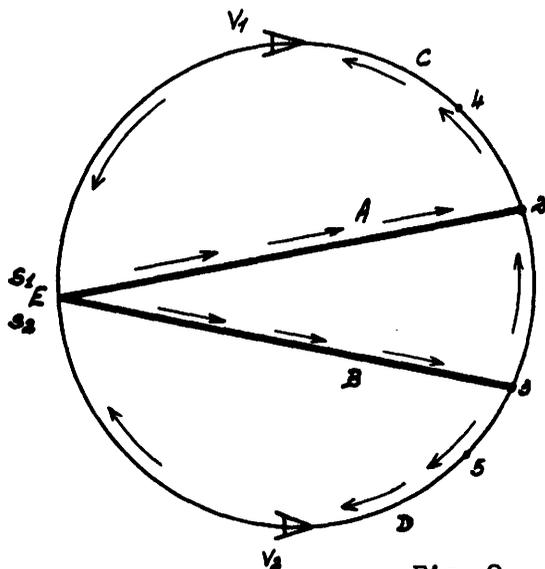


Fig. 9

- b) Faisons maintenant intervenir la perturbation v dans A, de E vers 2 en supposant que V_1 et V_2 restent en marche normale stable. Nous pouvons, dans ce cas, remplacer les deux sources V_1 et V_2 par une source unique V et une résistance additionnelle appropriée dans l'une des deux branches 2-4-C ou 3-5-D. Cet artifice est admissible pour autant que le déséquilibre entre les sources V_1 et V_2 ne va pas au-delà de l'arrêt d'aérage dans l'une des branches, hypothèse dans laquelle nous nous plaçons a priori.

Le schéma canonique du système est alors le suivant : voir fig. 10. On peut représenter les actions séparées de V d'une part, d'après la fig. 9 ou de la fig. 3 et de v d'autre part d'après la fig. 6.

Nous avons ainsi ramené le système à un système à deux sources "en harmonie".

Le circuit principal se compose uniquement des branches A (2-4) et C aussi longtemps que le sens de circulation de l'air est de 3 vers 2 dans la branche 3-2, et ce circuit est stable en toutes circonstances.

On voit que la branche D est stable puisque l'air y circule dans le sens 3-V sous l'action de l'une ou de l'autre des deux sources; en définitive, seules les deux branches B et 3-2 présentent un risque d'instabilité.

Le schéma montre clairement que l'inversion d'aéragage dans la branche B ne peut pas intervenir avant une inversion dans la branche 3-2 car, dans ce cas, les courants issus du noeud 3 seraient tous divergents à partir de ce noeud, ce qui est impossible.

Or, on a vu ci-dessus (fig.3) que cette branche 3-2 est frappée d'instabilité, en particulier en fonction de l'intensité de la source aéromotrice V .

Lorsque la source aéromotrice V croissant en intensité, l'inversion aura eu lieu dans la branche 3-2, alors l'inversion dans la branche B sera possible.

Cette inversion aura lieu, selon le sens indiqué par les flèches en pointillé, lorsque la source V continuant de croître en intensité, son action deviendra prépondérante dans B par rapport à celle de v .

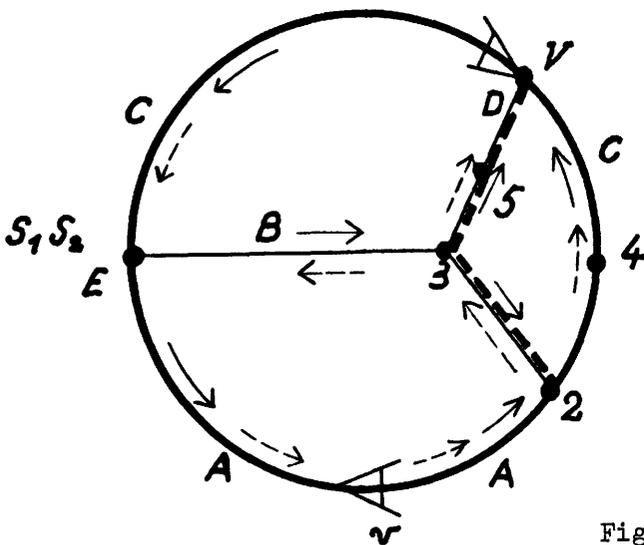


Fig. 10

Cette situation n'était pas atteinte dans le cas B de l'étude, en raison de la faiblesse de la perturbation v (braseros), alors qu'elle l'était dans le cas A (envoi d'eau en quantité importante dans le puits A).

Autres cas :

On étudierait de la même façon le 3e cas possible qui serait : défaillance de l'un des ventilateurs V_1 ou V_2 et présence d'une perturbation v plus ou moins importante.

Conclusion :

Cette étude montre bien l'intérêt de recourir à des représentations schématiques des réseaux d'aérage et, en particulier, des représentations préconisées par Budryk pour mettre en lumière les différents cas d'instabilité (avec risques d'inversion d'aérage dans certaines branches). Elle permet de mettre en lumière les risques présentés par le réseau très classique qui a été pris comme thème d'étude.

A N N E X E VIII

ETABLISSEMENT ET EXPRESSION ANALYTIQUE DE LA FORMULE
FONDAMENTALE DE BUDRYK POUR UN RESEAU RAMIFIE NE COM-
PORTANT QUE DEUX SOURCES AEROMOTRICES
EXTENSION DE LA FORMULE A CERTAINS RESEAUX MAILLES

1. Etablissement de la formule

La formule fondamentale de BUDRYK

$$\frac{h_e}{h_i} > \frac{r_e}{r_i}$$

a été démontrée dans le cas élémentaire de la figure 1, où le circuit principal ne comprend qu'une branche dans sa partie extérieure et une branche dans sa partie intérieure; dans ce cas, les résistances qui interviennent dans la formule sont celles (r_e et r_i) de ces branches. La formule fondamentale peut être étendue à un réseau ramifié quelconque ne contenant que deux sources aéromotrices, l'une de pression h_e , dans la partie extérieure, l'autre, de pression h_i , dans la partie intérieure du circuit principal (figure 2).

Nous allons démontrer que la condition nécessaire et suffisante pour que le débit dans la branche BE soit normal (de B vers E) est que l'on ait

$$\frac{h_e}{h_i} > \frac{R_e}{R_i}$$

les R désignant des combinaisons des résistances du sous réseau intérieur et du sous réseau extérieur qui seront précisées par la suite.

a) Le point de départ de la démonstration réside dans le fait que, suivant que le potentiel aéromoteur H_B du point B est supérieur, égal ou inférieur à celui H_E du point E, le débit q_0 de la branche BE va de B vers E, est nul ou va de E vers B. Pour la commodité

de la démonstration, nous envisagerons d'abord la condition de neutralité de la branche BE ($q_o = 0$, $H_B = H_E$) et nous allons prouver qu'elle entraîne

$$\frac{h_e}{h_i} = \frac{R_e}{R_i}$$

En effet, les points B et E étant équipotentiels, le réseau de la figure 2 est équivalent (au point de vue de la répartition des débits et potentiels) à deux sous réseaux séparés, tels qu'ils sont représentés à la figure 3, où la branche BE est remplacée dans chaque sous réseau par une branche de résistance nulle, pour tenir compte du fait qu'on doit avoir $H_B = H_E$. Considérons maintenant chaque sous réseau séparément. Etant donné la loi quadratique reliant débits et pertes de charge, il y a proportionnalité entre le carré du débit dans une branche quelconque (a, b, 1, 2, ...) et la pression aéromotrice (h_e) de la source unique appartenant au même sous réseau. On a en particulier, q_e et q_i étant les débits indiqués sur la figure 3 :

- pour le sous réseau extérieur : $\frac{h_e}{q_e^2} = \text{constante} = R_e$ (1)

- pour le sous réseau intérieur: $\frac{h_i}{q_i^2} = \text{constante} = R_i$ (2)

Par ailleurs, le débit q_o de la branche BE étant nul, on a nécessairement (figure 2):

$$q_e = q_i .$$

L'ensemble des relations (1), (2) et (3) entraîne :

$$\frac{h_e}{R_e} = \frac{h_i}{R_i} \quad \text{ou} \quad \frac{h_e}{h_i} = \frac{R_e}{R_i} \quad \text{c.q.f.d.}$$

- b) Considérons maintenant le cas où $H_B > H_E$ et où par conséquent un débit $q_0 \neq 0$ circule de B vers E . Il est encore possible de scinder le réseau de la figure 2 en deux sous réseaux séparés contenant chacun une seule source aéromotrice. Toutefois, la branche BE devra être remplacée par deux branches fictives : $B'E'$ dans le sous réseau extérieur et $B''E''$ dans le sous réseau intérieur (cf. figure 4). Dans la branche $B'E'$, le débit q'_e circule moyennant la perte de charge $H_B - H_E$ (il s'agit donc d'une résistance freinant l'aérage); dans la branche $B''E''$, le débit q'_i circule de E vers B dans le sens des potentiels croissants (il s'agit donc d'un ventilateur fictif favorisant l'aérage).

Comparons la situation de la figure 4 à celle de la figure 3, où les points B et E étaient reliés par une branche de résistance nulle. Le débit q'_e traversant la résistance $B'E'$ est nécessairement inférieur au "débit de court-circuit" q_e ; au contraire, le débit q'_i traversant le ventilateur $B''E''$ est supérieur au "débit de court-circuit" q_i . Enfin, l'existence du débit $q_0 \neq 0$ de B vers E dans le réseau réel implique $q'_e > q'_i$. On a donc la succession d'inégalités:

$$q_e^2 > q_e'^2 > q_i'^2 > q_i^2$$

et compte tenu des relations (1) et (2) définissant \mathcal{R}_e et \mathcal{R}_i

$$\frac{h_e}{\mathcal{R}_e} > q_e'^2 > q_i'^2 > q_i^2 > \frac{h_i}{\mathcal{R}_i}$$

ce qui démontre la formule de Budryk dans ce cas.

- c) Considérons enfin la situation $H_B < H_E$, où par conséquent un débit $q_0 \neq 0$ circule de E vers B . On pourra encore scinder le réseau de la figure 2 en deux sous réseaux séparés contenant chacun une seule source aéromotrice, à condition de remplacer la branche BE par deux branches fictives : $B'E'$ dans le sous réseau extérieur et $B''E''$ dans le sous réseau intérieur. Dans le cas présent, le sens des courants q'_e , q'_i et la valeur relative des potentiels H_E et H_B impliquent que la branche $B'E'$ soit un ventilateur et la branche $B''E''$ un frein (fig. 5).

On aura donc cette fois en comparant les figures 3 et 5 :

$$q'_e > q_e \quad \text{et} \quad q'_i < q_i$$

Enfin, le sens du débit q_0 de E vers B implique

$$q'_e < q'_i$$

on a donc la succession d'inégalités

$$q_e^2 < q_e'^2 < q_i'^2 < q_i^2$$

et par suite

$$\frac{h_e}{\mathcal{R}_e} < \frac{h_i}{\mathcal{R}_i} \quad \text{c.q.f.d.}$$

d) Nous avons ainsi démontré que les propositions

$$H_B > H_E', \quad H_B = H_E, \quad H_B < H_E$$

entraînent respectivement :

$$\frac{h_e}{\mathcal{R}_e} > \frac{h_i}{\mathcal{R}_i}, \quad \frac{h_e}{\mathcal{R}_e} = \frac{h_i}{\mathcal{R}_i}, \quad \frac{h_e}{\mathcal{R}_e} < \frac{h_i}{\mathcal{R}_i}$$

Comme les trois propositions de chaque ligne s'excluent mutuellement, les réciproques sont également vraies, c'est-à-dire que : suivant que h_e/\mathcal{R}_e est supérieur, égal ou inférieur à h_i/\mathcal{R}_i , le potentiel H_B est supérieur, égal ou inférieur au potentiel H_E . La formule de Budryk est donc une condition nécessaire et suffisante à la stabilité de l'écoulement dans la branche latérale 3 et, moyennant un choix adéquat de \mathcal{R}_e et de \mathcal{R}_i , dans une branche latérale quelconque.

2. Expressions analytiques de \mathcal{R}_e et de \mathcal{R}_i .

Le raisonnement précédent permet de comprendre la signification physique de \mathcal{R}_e et de \mathcal{R}_i , pour un réseau du type représenté à la figure 2. La grandeur \mathcal{R}_e (ou \mathcal{R}_i), qui a les dimensions d'une résistance aéraulique (kgs/m⁸) représente le

facteur de proportionnalité entre la pression aéromotrice h_e (ou h_i) et le carré du débit q_e (ou q_i) traversant un court-circuit réalisé entre les bornes B et E séparant le sous réseau extérieur du sous réseau intérieur. Cette remarque permet de donner l'expression analytique de R_e et de R_i pour un réseau ramifié.

Considérons à nouveau la figure 2 et admettons que la branche BE soit celle dont on étudie la stabilité de l'aéragé. Il s'agit donc de calculer les rapports

$R_e = h_e/q_e^2$ et $R_i = h_i/q_i^2$, les débits q_e et q_i étant les "débits de court-circuit" de chaque sous réseau dans les conditions que représente la figure 3. Nous effectuerons ce calcul de façon à en permettre la généralisation à un nombre quelconque de dérivation. Nous désignerons les branches latérales par des indices arabes 1, 2, 3, ... et les branches du circuit principal par des indices latéraux a, b, c, ...; pour la commodité des écritures, r_a représentera la somme des résistances des branches a et a', r_b la somme des résistances b et b', etc...

Avec ces notations, nous pouvons écrire^{+))}

$$R_e = \frac{h_e}{q_e^2} = \frac{h_e}{q_a^2} \cdot \frac{q_a^2}{q_b^2} \cdot \frac{q_b^2}{q_e^2} ; \quad (4)$$

on voit immédiatement l'extension possible à un plus grand nombre de dérivation. On a ensuite :

$$\frac{q_b}{q_c} = \frac{q_c + q_2}{q_c} = 1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}$$

car les débits se partagent entre deux branches parallèles (2 et c + c') en raison inverse de la racine carrée de leurs résistances.

+) pour le cas particulier considéré $q_c \equiv q_e$ et $q_d \equiv q_i$

On a semblablement :

$$\frac{q_a}{q_b} = \frac{q_b + q_1}{q_b} = 1 + \sqrt{\frac{r_{b,2,c}}{r_1}} \quad (5)$$

$r_{b,2,c}$ représentant la résistance combinée des branches $b, b', 2, c, c'$, ces dernières étant reliées par un court-circuit. Cette résistance est calculable classiquement :

$$r_{b,2,c} = r_b + \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{r_2}} + \frac{1}{\sqrt{r_c}}\right)^2}$$

il est avantageux d'écrire cette relation comme suit :

$$r_{b,2,c} = r_b + \frac{r_c}{\left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2} \quad (6)$$

on a enfin :

$$\frac{h_e}{q_a} = r_{a,1,b,2,c}$$

c'est-à-dire la résistance équivalente du sous réseau extérieur court circuité entre B et E et vu des bornes A et F. Cette résistance se calcule par la formule classique :

$$r_{a,1,b,2,c} = r_a + \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{r_1}} + \frac{1}{\sqrt{r_{b,2,c}}}\right)^2}$$

que l'on écrira avantageusement

$$r_{a,1,b,2,c} = r_a + \frac{r_{b,2,c}}{\left(1 + \sqrt{\frac{r_{b,2,c}}{r_1}}\right)^2} \quad (7)$$

Il n'y a plus qu'à combiner les formules (4), (5), (6) et (7), ce qui donne lieu à des transformations successives faciles

$$\begin{aligned}
 \mathcal{R}_e &= \left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2 \left(1 + \sqrt{\frac{r_{b,2,c}}{r_1}}\right)^2 \left[r_a + \frac{r_{b,2,c}}{\left(1 + \sqrt{\frac{r_{b,2,c}}{r_1}}\right)^2} \right] \\
 &= \left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2 \left[r_a \left(1 + \sqrt{\frac{r_{b,2,c}}{r_1}}\right)^2 + r_{b,2,c} \right] \\
 &= \left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2 \left[r_a \left(1 + \sqrt{\frac{r_{b,2,c}}{r_1}}\right)^2 + r_b + \frac{r_c}{\left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2} \right] \\
 &= r_a \left(1 + \sqrt{\frac{r_{b,2,c}}{r_1}}\right)^2 \left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2 + r_b \left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2 + r_c \\
 &= r_a \left(1 + \sqrt{\frac{r_b}{r_1} + \frac{r_c}{r_1 \left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2}}\right)^2 \left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2 + r_b \left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2 + r_c \\
 &= r_a \left[1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2} + \frac{r_b}{r_1} \left(1 + \frac{r_c}{r_2}\right)^2 + \frac{r_c}{r_1}} \right]^2 + r_b \left(1 + \sqrt{\frac{r_c}{r_2}}\right)^2 + r_c.
 \end{aligned} \tag{8}$$

On imagine assez aisément la méthode qu'il faudrait suivre pour calculer \mathcal{R}_e si le nombre de dérivations était plus important.

On trouverait de la même façon, pour autant que les débits aient les sens indiqués à la figure 2 :

$$\mathcal{R}_i = r_g \left[1 + \sqrt{\frac{r_d}{r_4} + \frac{r_f}{r_5} \left(1 + \frac{r_d}{r_4}\right)^2 + \frac{r_d}{r_5}} \right]^2 + r_f \left(1 + \sqrt{\frac{r_d}{r_4}}\right)^2 + r_d. \tag{9}$$

On voit que dans les expressions (8) et (9), les résistances des branches du circuit principal figurent uniquement

au numérateur et les résistances des branches latérales uniquement au dénominateur. Les grandeurs R_e et R_i sont donc des fonctions croissantes des résistances des branches du circuit principal et des fonctions décroissantes des résistances des branches latérales (pour autant que celles-ci soient toutes inversées dans le sous réseau intérieur et normales dans le sous réseau extérieur). Ces propriétés restent valables pour des réseaux ramifiés présentant un nombre quelconque de dérivations.

3. Extension à certains réseaux maillés

La démonstration exposée sous 1. ci-dessus est évidemment valable si l'un ou l'autre des sous réseaux (ou les deux à la fois) est maillé d'une façon quelconque, pourvu que chacun d'eux ne contienne qu'une seule source aéromotrice, que chacune des sources agissant isolément détermine dans la branche BE étudiée des courants de sens contraire, et qu'il n'existe aucune branche formant "pont" entre les deux sous réseaux (exemple: fig. 6).

R_e et R_i ont alors la même expression générale que pour les réseaux ramifiés :

$$R_e = \frac{h_e}{q_e^2} \qquad R_i = \frac{h_i}{q_i^2}$$

Mais leur expression analytique en fonction des résistances des différentes branches qui composent chacun des deux sous réseaux paraît ne pas être possible comme elle l'est dans le cas où les sous réseaux sont simplement ramifiés.

R_e et R_i seraient par contre mesurables directement sur un simulateur électrique.

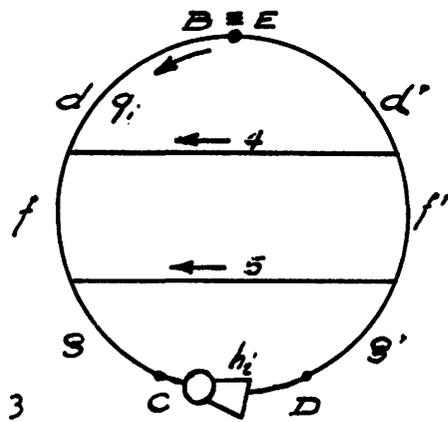
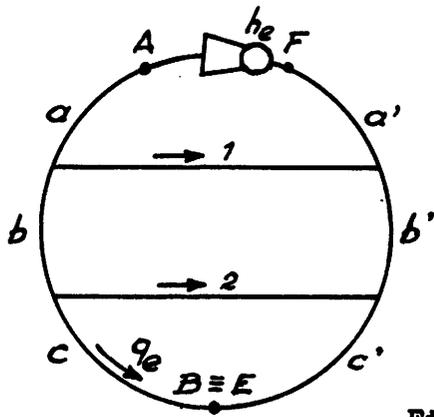
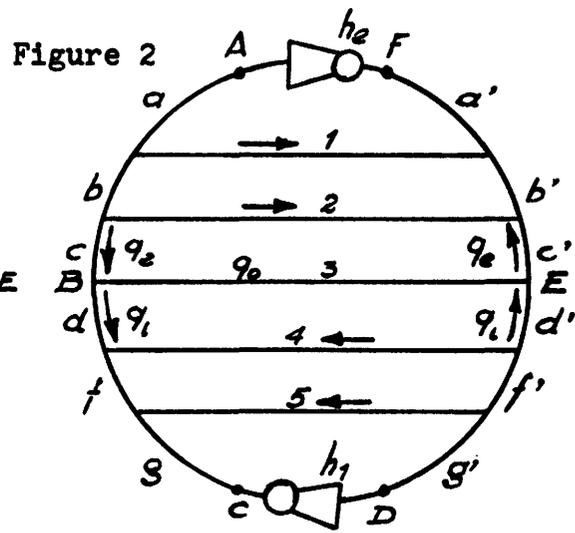
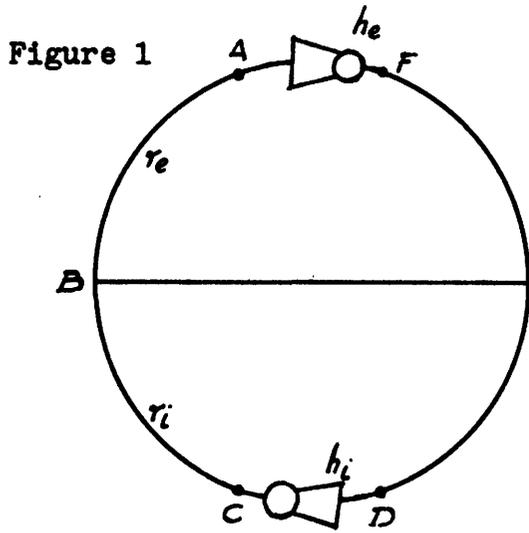


Figure 3

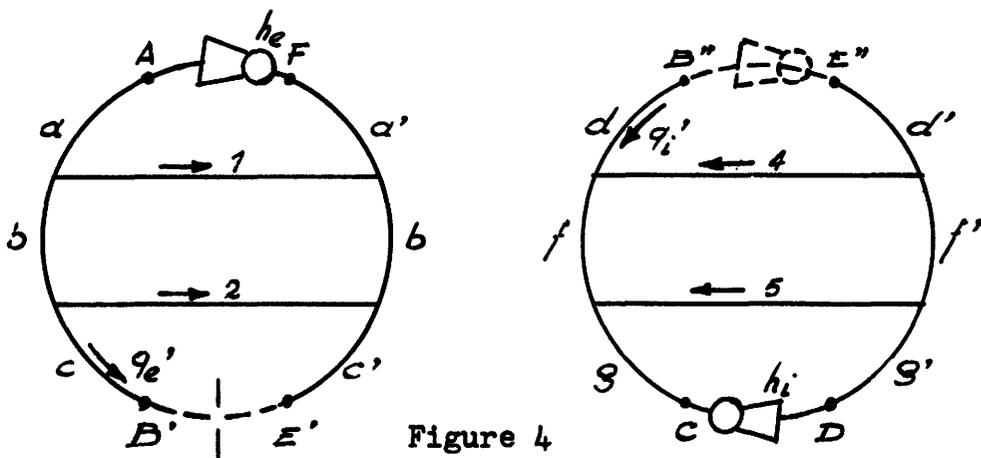


Figure 4

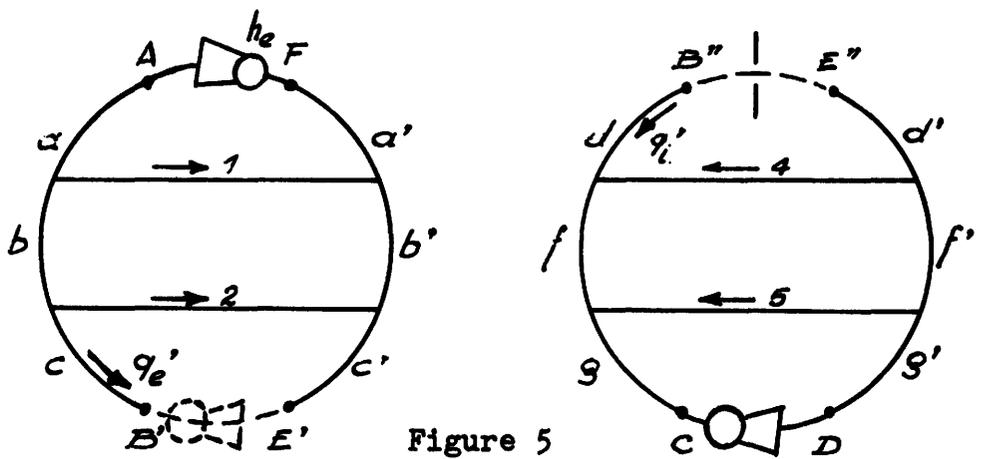


Figure 5

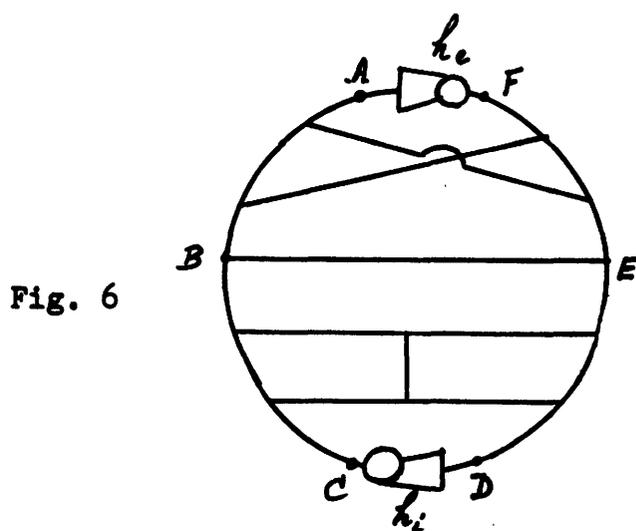
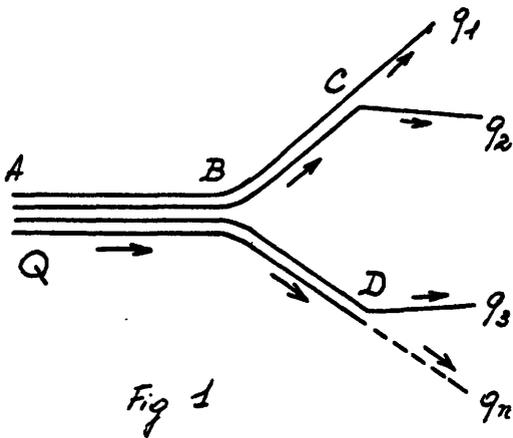


Fig. 6

A N N E X E IX

GENERALISATION DE LA FORMULE DE BUDRYK

I. Notion de filet ou courant élémentaire



Soit un courant Q qui se divise aux noeuds B, C, D en n . courants q_1, q_2, q_3, q_j, q_n . (fig.1)

On appelle filet, ou courant élémentaire q_1 , la fraction de débit q_1 qui circule dans les galeries qui alimentent le courant q_1 .

Ainsi on trouve dans la branche BC les filets q_1 et q_2 et dans la branche AB les filets q_1, q_2, q_3, q_j et q_n .

On peut faire de même si, au lieu de se diviser, les courants se réunissent.

L'ensemble des courants qui parcourent un réseau d'aérage peut ainsi être analysé en filets, ou courants élémentaires, conservant comme caractéristique un débit constant tout au long du trajet qu'ils parcourent, et se trouvant tantôt seuls, tantôt réunis avec d'autres lorsque d'autres filets empruntent les mêmes galeries. Dans une même galerie, il ne peut exister que des filets ayant le même sens d'écoulement.

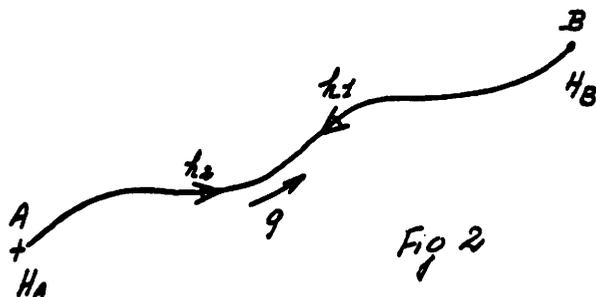
Résistance de trajet des filets

Un filet est donc un courant de débit constant qui circule sous l'action de forces aéromotrices : cet écoulement obéit évidemment aux lois fondamentales de l'écoulement des fluides et en particulier au principe de conservation de l'énergie

qui permet d'écrire (fig. 2) pour un écoulement de débit q entre 2 points A et B, de potentiels aéromoteurs H_A et H_B , à travers des sources aéromotrices de force $h_1, h_2 \dots h_i$:

$$\left[(H_A - H_B + \sum \bar{h}_j) \right] q = r q^3 \text{ ou : } r = \frac{H}{q^2}$$

où r , qui a les dimensions d'une résistance de conduit est appelée résistance de trajet du filet entre les points A et B.



Si le filet circule seul dans un conduit (ou dans une galerie), cette résistance est évidemment celle de ce conduit ou de cette galerie.

Mais, si plusieurs filets $q_1, q_2, q_3 \dots q_n$, de débit total Q , circulent dans une même galerie, entre deux points A et B, sous une force aéromotrice H , on a les relations suivantes entre résistances des trajets des filets r_1 et la résistance de la galerie R :

$$r_1 = \frac{H}{q_1^2} \quad ; \quad r_2 = \frac{H}{q_2^2} \quad \text{etc...} \quad R = \frac{H}{Q^2}$$

ce qui entraîne :

$$r_1 = R \left(\frac{Q}{q_1} \right)^2$$

$$r_2 = R \left(\frac{Q}{q_2} \right)^2 \quad \text{etc.....}$$

et en additionnant les puissances consommées $r_j q_j^3$ dans le tronçon A B, par chaque filet, leur somme étant égale à la puissance consommée totale RQ^3 , on tire :

$$R = \frac{\sum r_j q_j^3}{Q^3}$$

On voit donc que la résistance de trajet d'un filet qui parcourt une galerie de résistance R avec d'autres filets est toujours supérieure à R , proportionnellement au carré du rapport du débit total parcourant la même galerie, au débit du filet considéré.

La résistance de trajet d'un filet sur un parcours déterminé est donc fortement dépendante du débit des autres filets qui l'accompagnent sur ce parcours.

II - Champs de filets

Considérons maintenant un réseau quelconque, animé par un nombre quelconque de sources aéromotrices $h_1, h_2 \dots h_n$.

Il s'établira, dans toutes les branches du réseau un régime de courants parfaitement défini, que l'on pourra toujours analyser en filets correspondants à la plus grande division des courants dans les branches du réseau.

On appelle champ de filets de deux points A et B du réseau l'ensemble des filets qui passent à la fois par le point A et par le point B .

On voit tout de suite que, dans le cas général, le champ de filets de deux points quelconques n'est constitué que par une partie des filets du réseau.

Le champ peut être nul : par exemple pour les points a et b de la fig. 3, aucun filet ne passant à la fois par a et par b ; ou comprendre tous les filets du réseau, par exemple pour les points c et d de la branche qui contient le ventilateur unique.

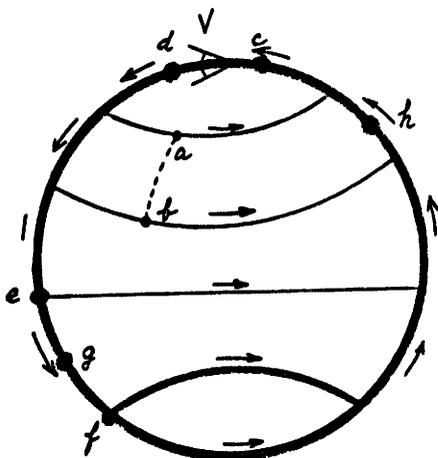


Fig. 3

Les branches qui contiennent le champ de filets des points e et f sont indiquées en traits renforcés. Le champ de filets des points g et h est le même que le précédent.

Un champ de filets qui contiendrait une ou plusieurs branches frappées d'instabilité du premier ou du second ordre (voir chap. II) serait modifié par toute circonstance susceptible de faire changer le sens de circulation dans ces branches.

Le champ de filets de deux points A B d'un réseau complexe caractérise donc la situation relative de ces deux points dans le réseau dans un état déterminé des courants qui régnent dans le réseau, et pas seulement en fonction de leur seule position géographique dans le réseau.

Champs partiels

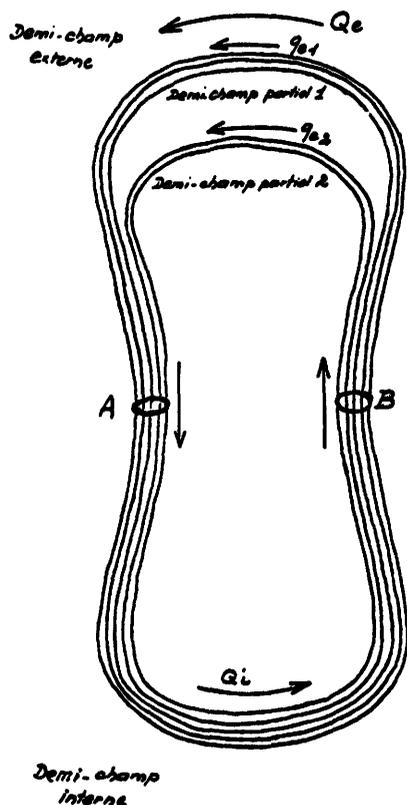


Fig. 4

Considérons, fig. 4, le champ de filets de deux points A et B, abstrait des branches du réseau dans lequel il circule; c'est un ensemble cohérent dans lequel on distingue d'abord deux parties principales: d'une part tous les filets qui circulent de B vers A et d'autre part tous les filets qui circulent de A vers B. On appellera l'une de ces parties le "demi-champ externe", l'autre le "demi-champ interne".

Par ailleurs, il peut exister, dans chacun des demi-champs, des groupements de filets distincts, par exemple par les forces aéromotrices dont ils sont le siège, ou par leur parcours nettement différencié; on appellera de tels groupements "demi-champs partiels".

Résistance globale équivalente d'un demi-champ ou d'un demi-champ partiel.

Considérons par exemple le demi-champ interne : pour chacun des filets on a: pour le parcours du point A au point B, le sens positif étant le sens des flèches :

$$\left[(H_A - H_B) + \sum \bar{h}_j \right] q = r q^3$$

et, pour l'ensemble des filets du demi-champ, les puissances étant additives :

$$(H_A - H_B) \sum \bar{q}_j + \sum \bar{h}_j q_j = \sum r_j q_j^3$$

Si l'on désigne par :

Q_i le débit total des filets qui constituent le demi-champ interne,

h_{im} la force aéromotrice moyenne pondérée agissant sur le demi-champ interne, telle que $h_{im} = \sum \frac{h_j q_j}{Q_i}$

$$R_i \text{ l'expression } \sum \frac{r_j q_j^3}{Q_i^3}$$

La formule s'écrit :

$$\underline{\underline{(H_A - H_B) + h_{im} = R_i Q_i^2}}$$

On aura, de même :

- Pour le demi-champ externe (parcours de B à A) :

$$(H_B - H_A) + h_{em} = R_e Q_e^2$$

- Pour le demi-champ externe partiel 1

$$(H_B - H_A) + h_{e1m} = R_{e1} q_{e1}^2$$

- Pour le demi-champ externe partiel 2

$$(H_B - H_A) + h_{e2m} = R_{e2} q_{e2}^2$$

R_i, R_e, R_{e2} ne sont pas autre chose que les résistances de galeries uniques où passeraient tous les filets et rien que les filets du demi-champ, ou du 1/2 champ partiel correspondant, entre les points A et B.

Discussion

Avant de faire usage de ces formules qui ont exactement la même forme que la formule utilisée pour les calculs classiques, il convient de discuter complètement leur contenu et leur signification.

Rappelons tout d'abord que le réseau de filets ne correspond pas à toutes les galeries du réseau: R_i et R_e ne sauraient donc, en aucun cas, être assimilées aux résistances du réseau ou même de parties de réseau dont les branches seraient combinées selon

les méthodes usuelles (séries - parallèles - résistances équivalentes des mailles etc...). C'est pourquoi nous désignerons désormais les résistances de champs de filets par le symbole \mathcal{R}

Rappelons aussi que les résistances de trajet des filets ne sont pas du tout celles des galeries dans lesquelles ils circulent, lorsqu'ils sont accompagnés par d'autres filets.

\mathcal{R} est donc fortement influencé par les filets des autres champs de filets qui empruntent les mêmes galeries que ceux auxquels cette grandeur correspond : pour un champ de filets déterminé,

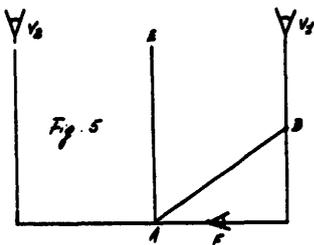
\mathcal{R} ne l'est donc que pour une situation déterminée du réseau et pas pour n'importe laquelle, alors que les résistances usuelles sont des caractéristiques des circuits, quels que soient les régimes d'écoulement qui y existent.

Rappelons enfin qu'un champ de filets ne contient en général pas toutes les sources qui existent dans un réseau lorsque ces sources sont multiples.

Les sources qui restent en dehors d'un champ de filets n'interviennent pas du tout dans le calcul de son hm, mais ont une influence qui peut être très importante sur le débit qui y circule, par l'intermédiaire de la variation de la résistance de trajet de filets dans les branches où circulent des filets qui dépendent d'elles.

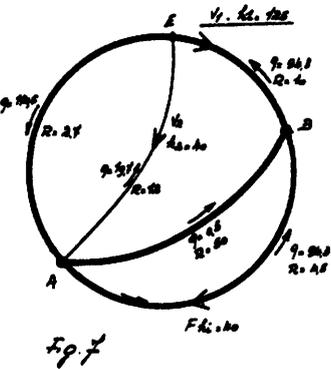
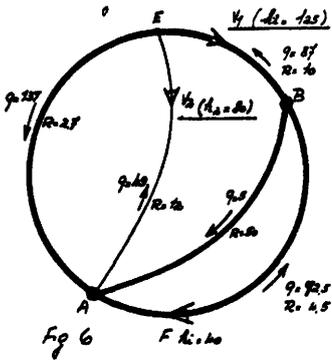
L'exemple ci-dessous aidera à comprendre ces phénomènes.

Soit un réseau selon schéma fig. 5 comportant un puits d'entrée d'air unique E A et deux puits de retour d'air avec chacun un ventilateur VI-V2, l'un des circuits comportant deux branches en parallèle A B et A F B, dont l'une contient une source aéromotrice F.



Le schéma Budryk du réseau peut être représenté par la fig. 6.

Le champ de filets des points A et B, indiqué en traits forts, comprend toutes les branches du réseau sauf la branche AV2E qui contient le ventilateur V2.

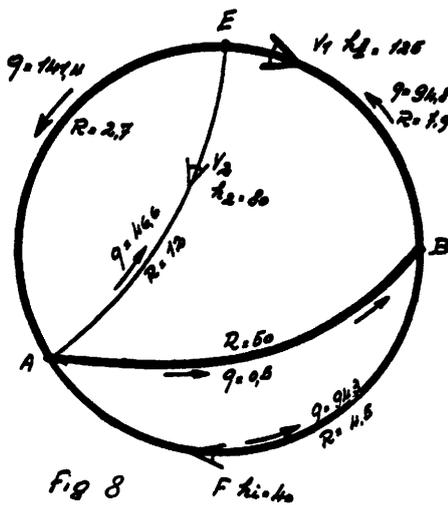


Ce réseau a été calculé par la méthode Hardy-Cross dans deux cas différents de la force aéromotrice h_2 du ventilateur V2: 80 et 40 mm d'eau et pour deux résistances de la branche BV1E.

- 1) Pour $h_2 = 80$, les résultats du calcul sont reportés sur la fig. 6; (résistances en murgues et débits en m^3/s .)
- 2) Pour $h_2 = 40$, h_1 et h_i ni aucune résistance n'ayant changé, les débits deviennent ce qu'indique la fig. 7.

On voit qu'une simple variation de la force aéromotrice de la source V2 par laquelle ne passe aucun filet du champ des points AB, suffit à faire changer le sens de circulation de l'air dans cette branche AB.

Ceci est dû uniquement à la variation de la résistance de trajet de filets dans la branche EA du seul fait de la variation de débit du filet de la branche A V2 E qui y circule.



- 3) h_2 étant ramené à 80 mm d'eau, mais la résistance de la branche BV1E étant abaissée de 10 à 7,9 murgues, on voit (fig. 8) que le débit dans la branche AB est le même que dans le cas 2) ci-contre.

III - Application à la théorie de Budryk

On a vu, au chapitre IV que Budryk s'était préoccupé principalement des conditions de stabilité des branches latérales dans les cas où la source aéromotrice accidentelle était en harmonie avec les sources aéromotrices normales. La formule fondamentale $\frac{h_e}{h_i} > \frac{q_e}{q_i}$ a été établie au chapitre IV

d'une part pour le cas de figure le plus élémentaire (fig. 4 du chap. IV), et à l'annexe VIII pour le cas d'un réseau simplement ramifié animé par deux sources seulement (1 source normale et 1 source accidentelle), lorsque l'inversion est imminente.

Le but de la présente annexe étant d'établir les conditions de validité de cette formule dans le cas le plus général, nous limiterons la présente étude aux mêmes conditions générales, c'est-à-dire que :

- a) la branche pour laquelle on étudie la stabilité ne contient pas de source aéromotrice
- b) L'instabilité de la branche étudiée résulte de la présence de sources en harmonie.

Soit un réseau quelconque, en particulier maillé de façon quelconque, animé par un nombre quelconque de sources aéromotrices disposées individuellement en harmonie ou en opposition.

Soit A B une branche quelconque de ce réseau, mais sur laquelle n'existe aucune source aéromotrice.

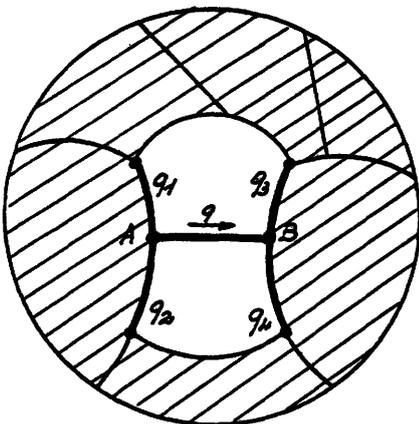


Fig. 9

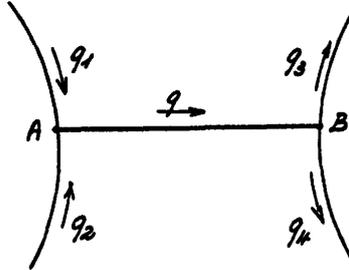
La situation de cette branche peut être schématisée par la fig. 9, où A et B sont deux noeuds d'où partent (ou aboutissent) les branches qui réunissent la branche A B au reste du réseau.

Soit q le débit qui parcourt A B de A vers B ($H_A > H_B$) q_1, q_2, q_3, q_4 , les débits des 4 autres branches.

Il y a quatre combinaisons possibles :

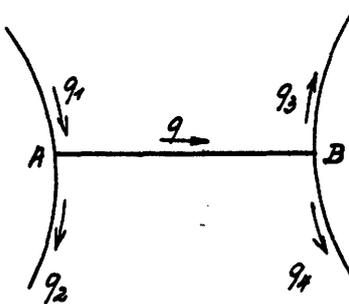
$$1^\circ) \begin{cases} q_1 + q_2 = q \\ q_3 + q_4 = q \end{cases}$$

Fig. 10



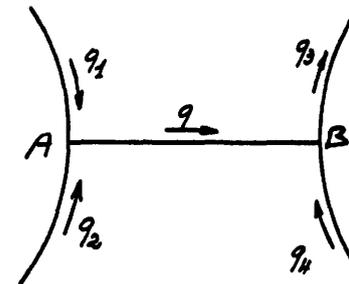
$$2^\circ) \begin{cases} q_1 - q_2 = q \\ q_3 + q_4 = q \end{cases}$$

Fig. 11



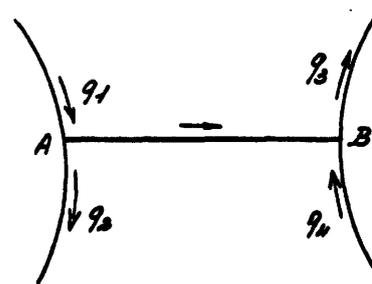
$$3^\circ) \begin{cases} q_1 + q_2 = q \\ q_3 - q_4 = q \end{cases}$$

Fig. 12



$$4^\circ) \begin{cases} q_1 - q_2 = q \\ q_3 - q_4 = q \end{cases}$$

Fig. 13



1er cas - fig. 10

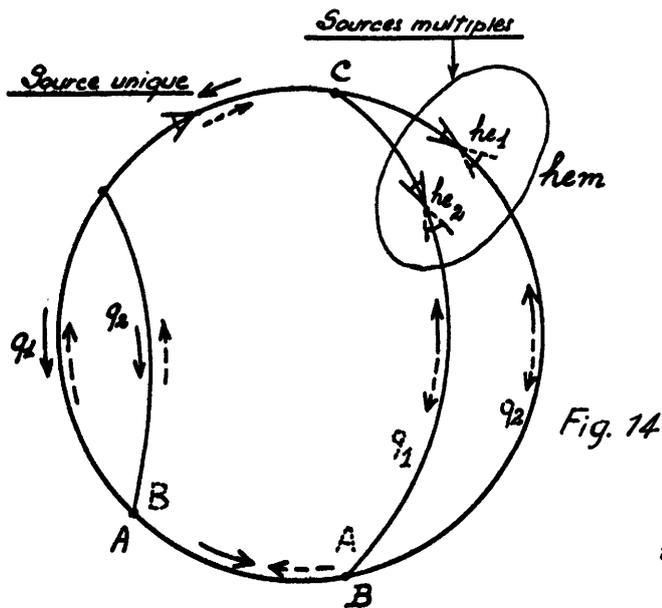
Le 1/2 champ interne (A vers B) est constitué par tous les filets qui passent dans la branche AB et rien qu'eux. Comme cette branche ne comporte, par hypothèse, aucune source aéromotrice, $H_A > H_B$.

Le 1/2 champ externe (B vers A) est constitué par tous les filets qui composent le courant q_1 (1) et le courant q_2 , et ces filets se retrouvent tous, et rien qu'eux, dans les courants q_3 et q_4 .

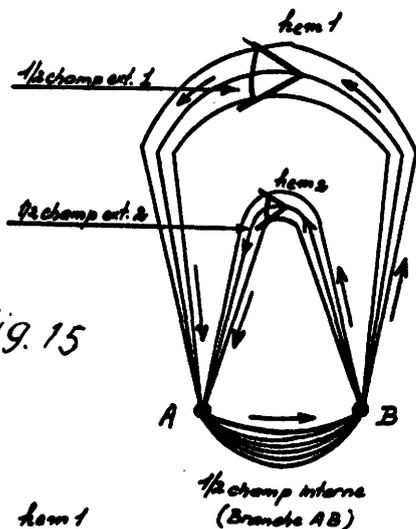
1) dans ce qui suit: par abréviation "filets q_1 , filets q_2 ," etc...

Chacun des filets du 1/2 champ externe passe obligatoirement par au moins une source aéromotrice dirigée de B vers A, puisque $H_A > H_B$.

- a) Considérons d'abord l'ensemble des filets q_1 d'une part et l'ensemble des filets q_2 d'autre part. Deux cas possibles :



- a-1) Il n'y a pas de source aéromotrice par laquelle il ne passe que des filets de l'un des deux demi-champs partiels q_1 ou q_2 . C'est le cas où le champ des points AB ne comporte qu'une source unique ou un ensemble de sources équivalent à une source unique : schéma Budryk selon fig. 14 (sources et flèches en traits pleins). Il n'y a pas de problème de stabilité pour la branche AB.



- a-2) Les sources aéromotrices animent les unes uniquement des filets de q_1 et, par conséquent les autres, uniquement des filets de q_2 . Dans ce cas, ou bien on est simplement dans le cas de la fig. 14 (sources et flèches en pointillés), ou alors le demi-champ externe se compose effectivement de deux demi-champs partiels distincts selon fig. 15.

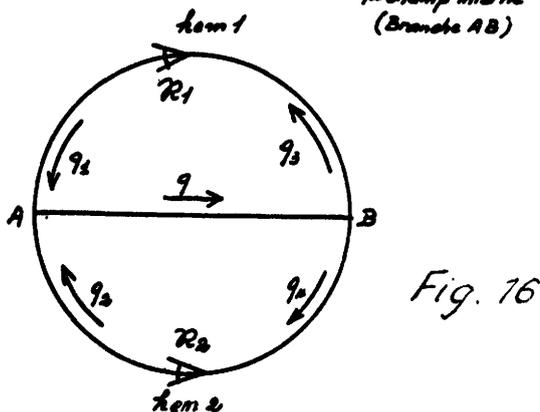


Schéma Budryk selon fig. 16, où l'on reconnaît le schéma classique des sources en opposition, qui ne font pas l'objet de cette étude (AB est stable).

b) Si l'on considère l'ensemble des filets q_3 d'une part et q_4 de l'autre, on aboutit évidemment aux mêmes conclusions.

Nota : Pour l'examen des autres cas, l'étude de la décomposition possible des 1/2 champs en 1/2 champs partiels ne sera pas détaillée, comme ci-dessus, on se contentera d'en indiquer le résultat.

2ème cas - fig. 11

Le 1/2 champ interne (A vers B) comporte encore tous les filets qui passent par A B et rien qu'eux.

Quant aux filets du 1/2 champ externe (B vers A) ils se groupent encore en deux affluents de B mais un seul afflué vers A, il est donc impossible de les scinder en deux à partir du point A on aboutit alors au schéma selon fig. 17.

Les schémas Budryk correspondants sont alors :

- soit ceux des fig. 18 ou 19

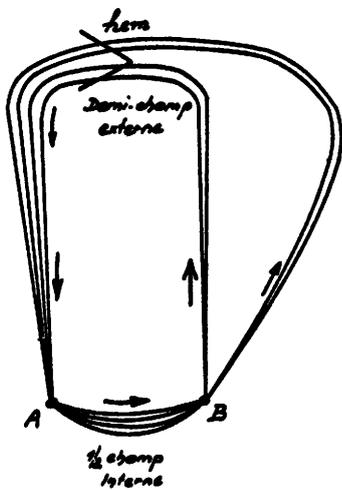


Fig. 17

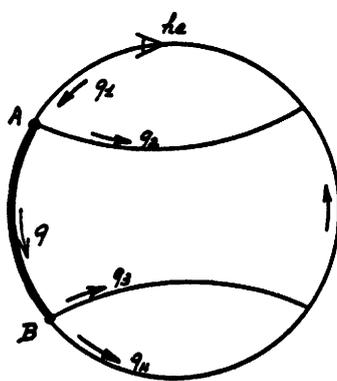


Fig 18

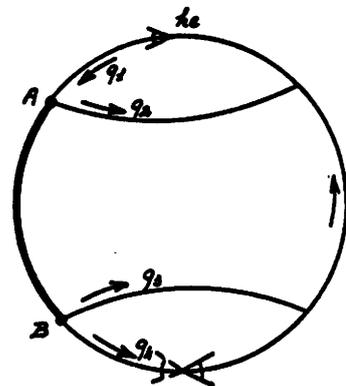


Fig. 19

avec ou sans source autre que he . Il s'agit alors soit d'un système à une seule source (ou groupe de sources), soit d'un système à plusieurs sources où A B est un élément de circuit principal, cas qui n'entre pas dans l'objet de cette étude,

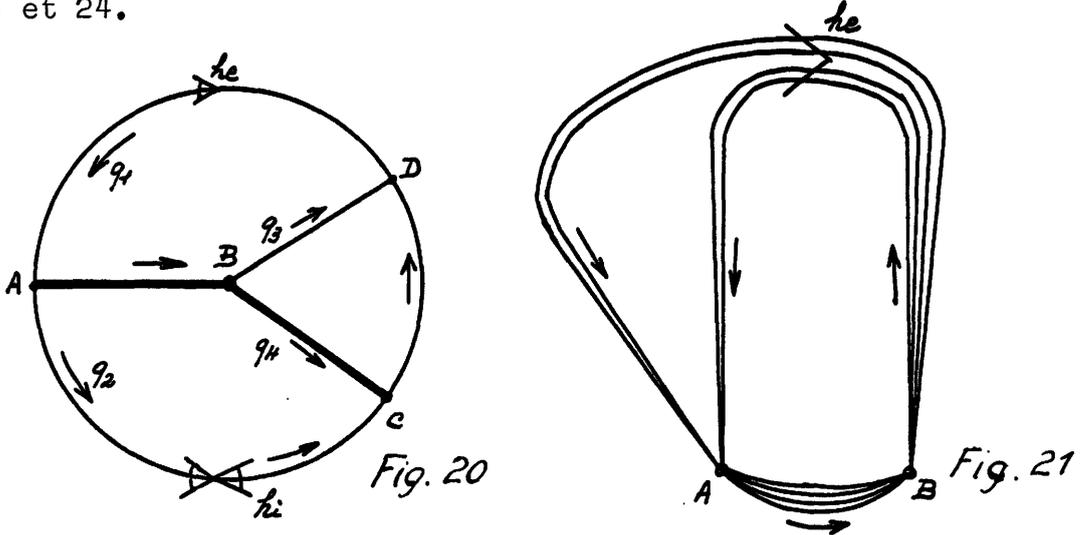
- soit selon fig. 20, avec ou sans sources multiples.

Lorsqu'il y a des sources multiples, A B présente comme caractéristique d'être, pour le circuit principal des sources, une latérale qui ne relie pas deux noeuds de ce circuit principal.

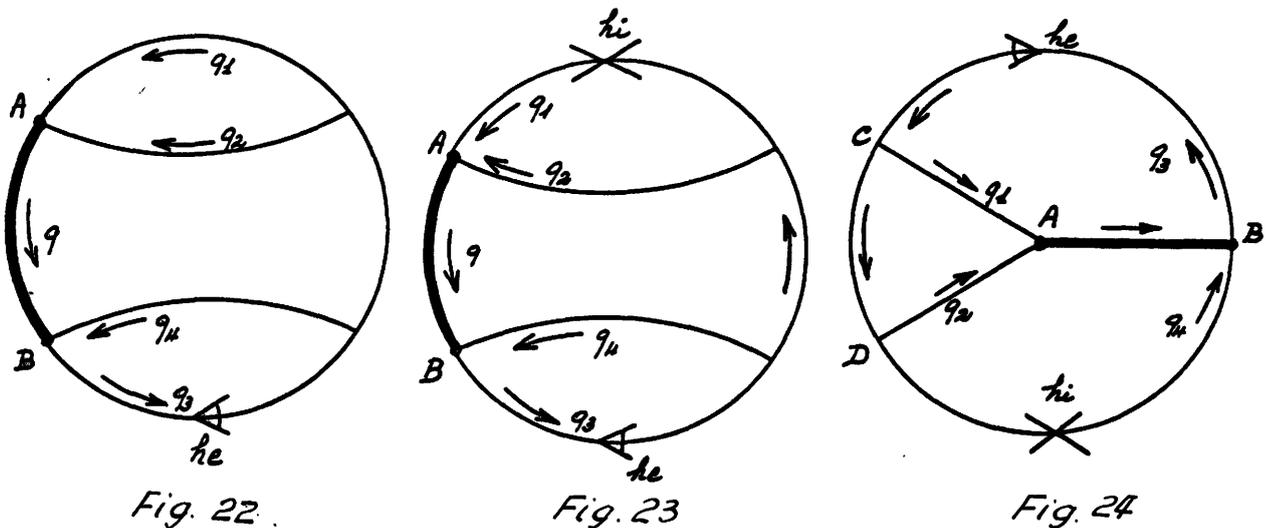
On reviendra plus loin sur ce cas, qui est un cas particulier de l'instabilité que nous étudions, pour h_e et h_i en harmonie.

3ème cas - fig. 12

Ce cas est extrêmement voisin du précédent, les figures correspondantes sont les fig. ci-dessous : 21, 22, 23 et 24.



Comme dans le cas précédent, la branche AB est un élément de circuit principal, qui ne nous intéresse pas, ou un élément de branche latérale qui ne réunit pas deux noeuds situés sur le circuit principal des sources. On reviendra sur ce cas.



4ème cas - Fig. 13

Dans ce cas, c'est le 1/2 champ de filets allant de B vers A (1/2 champ externe) qui est unique, par contre, le 1/2 champ allant de A vers B peut être distingué en deux parties distinctes :

- a) tous les filets qui parcourent la branche AB (courant q)
- b) les filets du courant q2 qui reviennent par q4 : or, il n'y en a pas nécessairement.

S'il n'y en a pas, le schéma Budryk est celui de la fig. 25 (hi en harmonie ou en opposition avec he) où AB est

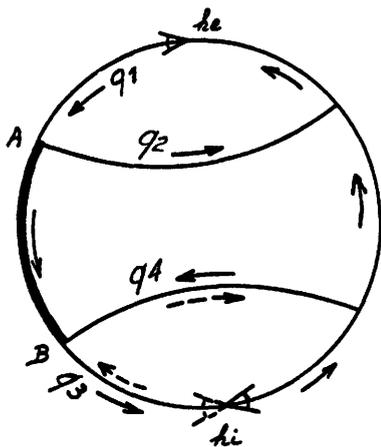


Fig. 25

toujours une branche de circuit principal, cas qui ne nous intéresse pas - on remarquera que le cas hi en opposition (pointillés) est le cas choisi pour l'étude de stabilité exposé à l'annexe VII.

Si, au contraire, le 1/2 champ de filets "interne" de A vers B comprend des filets partant par q2 et revenant par q4, alors la configuration du champ de filets de AB est conforme à la fig. 26.

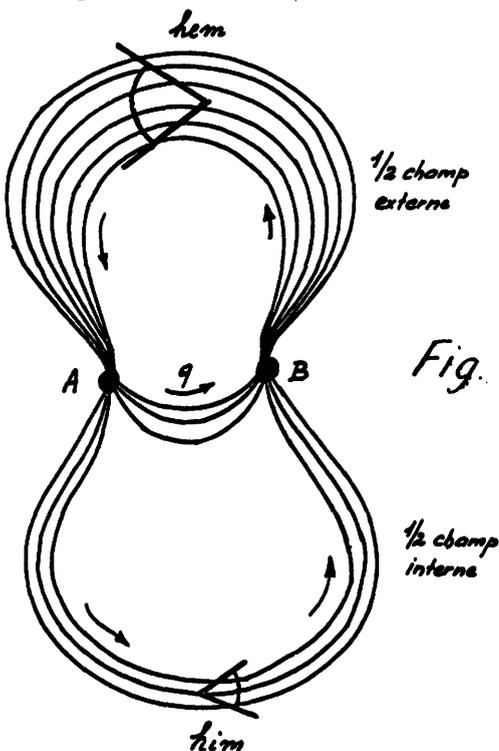
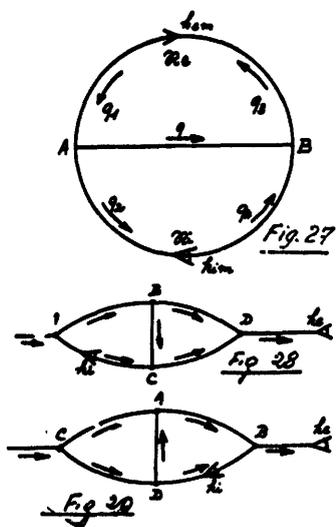


Fig. 26

Le courant q de A vers B impose $H_A > H_B$. Dans ces conditions, le 1/2 champ externe comporte obligatoirement des forces aéromotrices dont la valeur moyenne pondérée est hem.

Par contre, le champ interne ne comporte pas forcément de forces aéromotrices.

- S'il n'en comporte pas, c'est que l'on est tout simplement en présence d'un champ de filets animé par une seule source ou un groupe de sources assimilable à une seule source.



- S'il en comporte, on reconnaît tout de suite le cas type que nous recherchons. En effet si l'on fait le schéma Budryk de ce champ de filets (fig. 27), en représentant d'une part le demi-champ externe avec sa résistance R_e par le demi-cercle B - hem - A, la branche AB par le diamètre AB et le reste du demi-champ interne avec sa résistance R_i par le demi-cercle A - him - B, on retombe sur une figure qui est exactement la même que celle du cas élémentaire fig. 4 du chap. IV, 3a)

Dans ces conditions, le calcul étant conduit exactement de la même façon, on trouve que la condition nécessaire et suffisante pour que l'écoulement ait lieu de A vers B dans la branche AB s'écrit :

$$\frac{h_{em}}{h_{im}} > \frac{R_e}{R_i}$$

Cette formule exprime comment la formule fondamentale, établie dans le cas élémentaire, s'étend au cas le plus général: h_{em}, h_{im}, R_e et R_i étant définis de façon précise, comme indiqué sous II) ci-dessus, dans un réseau absolument quelconque.

On remarquera que AB est une branche reliant deux noeuds situés sur le circuit principal des sources.

Reprenons maintenant les cas des fig. 20 et 24, des branches latérales qui ne réunissent pas deux noeuds situés sur le circuit principal.

Si nous développons les fig. 20 et 24, par rapport à h_e , on obtient respectivement les fig. 28 et 29 où l'on voit

que BC de la fig. 28 et AD de la fig. 29 sont les diagonales où le sens s'inverse forcément pour une certaine force aéromotrice de la source h_i (qui peut d'ailleurs être assez faible). Après ces inversions, le point B de la fig. 20 et le point A de la fig. 24 sont situés sur le circuit principal, et on est ramené au cas général.

On doit remarquer que de toute façon, dans l'un et l'autre cas et en raison du sens des courants vers le noeud B (fig. 20) ou A (fig. 24) l'inversion dans AB ne peut pas survenir avant l'inversion dans BC (fig. 20) ou dans AD (fig. 24).

On voit, de la même façon, que l'inversion dans la 3ème branche (BD de la fig. 20 et AC de la fig. 24) ne peut intervenir qu'après l'inversion dans la branche AB; en faisant le développement des schémas 20 et 24 par rapport à h_i , on voit de plus que cette inversion, qui est due à une instabilité du premier ordre, ne peut intervenir qu'à la double condition que les résistances des branches adjacentes le permettent et que la force aéromotrice h_e devienne relativement faible par rapport à h_i .

En conclusion : l'instabilité du 2ème ordre que nous étudions n'existe à proprement parler que pour les branches latérales qui relient deux noeuds placés sur un circuit principal défini par deux ou plusieurs sources aéromotrices individuellement ou globalement (h_e et h_{im}) en harmonie.

La condition nécessaire et suffisante de cette stabilité s'écrit alors :

$$\frac{h_{em}}{h_{im}} > \frac{R_e}{R_i}$$

R_e et R_i étant les résistances globales équivalentes des 1/2 champs de filets internes et externes des extrémités de la branche étudiée (branche non comprise) h_{em} et h_{im} étant respectivement les forces aéromotrices pondérées qui agissent sur les filets du demi-champ externe et du demi-champ interne.

Lorsqu'une branche latérale ne débouche pas par ses deux extrémités sur un circuit principal, c'est qu'elle est elle-même une diagonale ou qu'elle communique avec une diagonale.

Si elle est une diagonale, elle est frappée d'une instabilité du premier ordre qui ne dépend pas de la formule fondamentale de Budryk; si elle débouche dans une diagonale, elle sera frappée de l'instabilité du 2ème ordre régie par la formule de Budryk, mais seulement après inversion dans la diagonale la plus sensible dans laquelle elle débouche.

DISCUSSION DES CONDITIONS D'APPLICATION DE LA FORMULE

Autres branches et autres champs de filets du réseau

Replaçons maintenant le champ de filets qui nous intéresse (1) dans le réseau d'où on l'avait extrait.

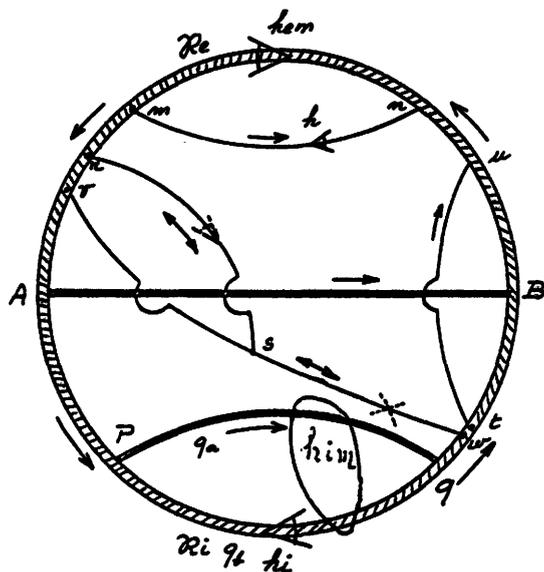


Fig. 30

Les filets du champ de filets des points A et B parcourent seulement certaines galeries du réseau. Pour la clarté de la représentation (fig. 30), on a regroupé suivant le cordon hachuré toutes les galeries parcourues par les filets qui passent à la fois par les points A et B, par au moins une source du système externe (h_e), et par au moins une source du système interne h_i ; et on a indiqué en traits forts les galeries parcourues par les autres filets du champ: sur la fig. 30, branche AB et branche p.q.

Les branches du réseau où ne circule aucun filet du champ des points A et B, et il y en a dans le cas général, sont disposées de façon quelconque, telles celles qui sont indiquées en traits fins ordinaires.

1) Dans tout ce qui suit, on raisonnera pour une situation où les extrémités de la branche étudiée sont situées sur un circuit principal des sources.

Elles constituent :

- soit des branches latérales telles que m.n, avec ou sans source aéromotrice, et pour autant que le sens de circulation y est de m vers n ;
- soit des "ponts" comme les branches r.s - t.u - v.w qui sont des "latérales" au sens général, mais qui font communiquer entre elles la "zone externe" et la "zone interne", ces branches peuvent contenir ou non des sources aéromotrices.

La branche p q, par contre appartient au champ des points A et B, mais seulement pour autant que le sens de circulation y est de p vers q.

S'il y a inversion d'aérage dans cette branche, elle n'appartient plus au champ de filets considéré et devient une branche latérale étrangère au champ comme la branche m.n. Cette branche ne contient, par hypothèse, aucune source aéromotrice, sinon elle appartiendrait au circuit principal.

Circuit principal relatif à la branche AB

Le cordon hachuré de la fig. 30 matérialise le circuit principal relatif à la branche AB, qui n'est qu'une partie des circuits principaux des sources.

On remarquera, en effet, que les filets qui passent par le "pont" t.u. appartiennent aussi en partie au circuit principal des sources, mais pour une fraction qui ne passe pas par le point B.

Interaction des différents champs

Ainsi qu'on l'a déjà vu page 5 ci-dessus, les résistances globales équivalentes des demi-champs externe et interne qui interviennent dans la formule fondamentale sont fortement dépendantes des débits des filets des autres champs qui parcourent les mêmes galeries.

Il en résulte que la condition fondamentale qui régit la stabilité de la branche AB, sera dépendante non seulement des conditions qui règnent dans les galeries parcourues par le champ de filets de la branche AB mais aussi des conditions qui règnent dans toutes les autres galeries du réseau : c'est-à-dire

de leurs résistances et de l'activité des sources aéromotrices qui y existent. L'exemple calculé (fig. 6 et 7 ci-dessus) montre que la seule variation d'activité d'une source aéromotrice étrangère au champ de filet des extrémités d'une branche peut provoquer une inversion de l'aé-
rage dans cette branche, par son action indirecte sur \mathcal{R}_e .

Signification de h_{im}

Ainsi qu'on le voit sur la fig. 30, le demi-champ externe des points A et B passe tout entier par hem, et hem n'est pas autre chose que la force aéromotrice moyenne des ventilateurs principaux, pondérée proportionnellement aux débits qu'ils brassent, lorsqu'ils sont multiples et que leurs forces aéromotrices sont différentes.

Il n'en est pas du tout de même pour le demi-champ interne qui ne passe que pour seulement une partie de son débit par la source interne h_i lorsque l'on choisit pour branche à stabiliser une autre branche que la plus voisine de celle de l'incendie.

Dans le cas de la fig. 30, c'est-à-dire lorsque le sens de circulation est normal dans la branche p.q., h_{im} a pour valeur, selon la définition :

$$h_{im} = h_i \frac{q_b}{q_a + q_b}$$

Donc, alors que hem sera toujours du même ordre de grandeur que les forces aéromotrices des ventilateurs principaux, h_{im} au contraire pourra être très inférieur à h_i .

On doit alors se demander quel sera l'effet d'une variation de résistance apportée à une branche latérale de la zone interne telle que pq de la fig. 22, sur la formule fondamentale, puisque par exemple une augmentation de résistance aura pour conséquence de faire augmenter à la fois h_{im} et h_i .

La formule fondamentale pouvant s'écrire aussi :

$$\frac{hem}{\mathcal{R}_e} > \frac{h_{im}}{\mathcal{R}_i}$$

il faut donc déterminer l'effet d'une variation de résistance des latérales sur le rapport $\frac{h_{im}}{\mathcal{R}_i}$

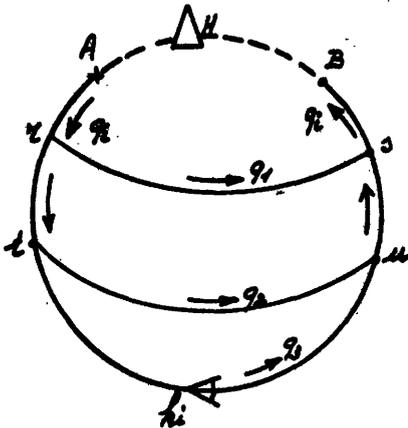


Fig. 31

Soit le réseau de la zone interne selon fig. 23; on a, selon la définition

$$R_i = \frac{h_{im} + \Delta H}{2} \quad \text{ou}$$

$$q_i^2 = \frac{h_{im} + \Delta H}{R_i}$$

$$h_{im} = h_i \frac{q_3}{q_1}$$

L'augmentation de résistance d'une branche latérale quelconque \$r\$, \$s\$, ou \$t\$, \$u\$, aura, d'après les propriétés générales des réseaux les conséquences suivantes :

- diminution de \$q_1\$ et augmentation de \$q_3\$ donc
- augmentation de \$h_{im}\$
- augmentation de \$\Delta H\$

Il en résulte que, d'après la formule $q_i^2 = \frac{h_{im} + \Delta H}{R_i}$

comme \$q_1\$ diminue, \$h_{im}\$ et \$\Delta H\$ augmentant chacun pour soi, $\frac{h_{im}}{R_i}$ diminue.

$\frac{h_{im}}{R_i}$ est donc une fonction décroissante des résistances des branches latérales.

Si nous faisons croître les résistances de toutes les branches latérales jusqu'à l'infini (branches barrées hermétiquement), $\frac{h_{im}}{R_i}$ tendra vers la valeur $\frac{h_i}{R_i}$

\$R_i\$ étant la résistance classique du circuit principal du foyer d'incendie entre les points A et B.

Ainsi pour toute valeur non nulle des résistances des branches latérales internes :

$$\frac{h_{im}}{R_i} > \frac{h_i}{R_i}$$

$\frac{h_i}{R_i}$ étant la valeur minimale possible de \$\frac{h_{im}}{R_i}\$, atteinte pour

une obturation totale de tous les circuits latéraux internes.

SERVICES DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

13797/2/67/1