

Le fonçage des puits de mines à plus de 1000 mètres de profondeur à travers les sables bouillants

par M. BIQUET,
Ing. Civil des Mines A.I.L.G.

SAMENVATTING

Voor het delven van nieuwe schachten in de Kempen komt alleen de bevroeringsmethode in aanmerking. De schrijver van dit artikel bestudeert de toepassingsmogelijkheden ervan voor schachten met een diepte van 1000 m of meer.

De theorie van Lebreton wijst op een begrenzing van het toepassingsgebied tot een middelmatige diepte: tengevolge van de warmteuitwisselingen tussen dalende en stijgende loogstromen ontstaat het grootste deel van het koeleffect in het bovenste deel van de diepe bevroeringsboringen, en het schijnt onmogelijk, tenzij na zeer lange tijd, een ijsmuur met voldoende weerstand op grote diepte te verwezenlijken.

Om aan dit euvel te verhelpen stelt schrijver twee werkwijzen voor, die samen toegepast kunnen worden: een trapsgewijze, van boven naar onder uitgevoerde bevroering, en het calorifugeren van de binnenste bevroeringsbuisen (dalende loog) door het aanbrengen van een speciaal ebonietlaag op de binnenvand ervan. Door gelijktijdig van deze twee hulpmiddelen gebruik te maken zouden de grootste diepten kunnen bereikt worden die tegenwoordig in aanmerking komen.

Verder heeft de schrijver talrijke en belangwekkende proeven uitgevoerd over de breukvastheid van monsters bevroren grond op temperaturen van -5° tot -20° C en met verschillende watergehalten en aanstampingsgraden. De breukvastheid neemt met diepere bevroeringstemperaturen toe, en neemt sterk af wanneer het porieënvolume toeneemt.

Met een porieënvolume van 10 % bedraagt de vastheid onder snelle belasting van 70 tot 200 kg/cm² volgens de temperatuur en het gebruikt grondmateriaal. Zij is meer dan tien maal groter als de vastheid van zuiver ijs en is des te groter naargelang de korrelsamenstelling van de grond grover is.

De proeven met langzaam stijgende belasting wijzen op een samendrukking van de monsters die, in functie van de tijd, naar een asymptotische waarde streeft. Boven en bepaalde grensbelasting echter (van 20 tot 70 kg/cm² volgens de temperatuur en het materiaal) verkrijgt men geen stabilisatie meer: de monsters ondergaan een onbepaalde plastische vervorming.

RESUME

Pour les creusements de puits à foncer éventuellement en Campine dans l'avenir, seule la méthode par congélation est à retenir. L'auteur étudie la possibilité de son application à des puits de 1000 m et plus de profondeur.

La théorie de Lebreton indique une limitation à l'emploi du procédé dès les profondeurs moyennes: par suite des échanges thermiques dans les tubes congélateurs entre les courants de saumure descendant et impossible, si ce n'est après un temps très long, de réaliser un mur de glace résistant à grande profondeur.

Pour remédier à cette situation, l'auteur envisage deux procédés qui peuvent être appliqués simultanément: la congélation progressive par passes descendantes et le calorifugeage, au moyen d'une couche binaison de ces deux moyens permettrait d'atteindre les plus grandes profondeurs envisagées actuellement.

L'auteur a, d'autre part, exécuté des essais nombreux et instructifs sur la résistance d'échantillons de sols congelés à des températures variant de -5° à -20° C et à des degrés de compacité et d'humidité divers. Cette résistance augmente lorsque la température de congélation devient plus basse, et diminue très fort quand le coefficient de vides augmente.

Avec un coefficient de vides de 10 %, la résistance sous une charge appliquée rapidement varie de 70 à 200 kg/cm² selon la température et le matériau employé. Elle est plus de dix fois supérieure à celle de la glace pure et est d'autant plus forte que la granulométrie du sol congelé est plus grossière.

Les essais de mise en charge lente conduisent à un affaissement qui se stabilise d'une manière asymptotique en fonction du temps. Au delà d'une certaine charge limite cependant (de 20 à 70 kg/cm² selon la température et le matériau), on n'obtient plus de stabilisation et les échantillons fluent indéfiniment.

INTRODUCTION

Parmi les problèmes qui se poseront à brève échéance à l'industrie charbonnière en Belgique se présentera évidemment celui de l'extension de la mise à fruit du Bassin de la Campine. Les Sociétés qui exploitent déjà devront penser à créer de nouveaux sièges et l'Etat se doit d'envisager la mise en exploitation des parties qu'il s'est réservées dans ce bassin.

Or, on sait que le toit du terrain houiller va en s'approfondissant vers le nord et vers l'ouest. Il en résulte qu'à part quelques rares exceptions, tous les nouveaux puits à creuser devront atteindre des profondeurs de plus en plus grandes. Le record de profondeur est actuellement détenu par les charbonnages de Houthaelen dont les puits eurent à traverser 625 à 635 mètres de morts terrains, tandis que le record des difficultés vaincues appartient aux charbonnages d'Helchteren et Zolder dont les puits eurent à traverser 620 mètres de morts terrains, mais pour des diamètres utiles de 5,00 m et 6,00 m, alors que le diamètre utile des puits de Houthaelen n'était que de 5,00 m.

Ce sont là certainement des performances magnifiques; mais, comment s'y prendra-t-on pour résoudre le problème quand on aura à traverser 800, 1000, 1500, voire 2000 mètres de profondeur?

Telle est la question à laquelle nous pensons donner la réponse adéquate dans le présent article.

Méthode de fonçage à employer (1)

Le choix du procédé à employer pour creuser un puits en terrain aquifère est une question très délicate et qui ne peut être résolue qu'après une étude approfondie de toutes les conditions du problème. Les trois procédés qui actuellement ont encore droit de cité — cimentation, niveau plein (système Honigmann) et congélation — demandent l'un comme l'autre l'intervention de spécialistes expérimentés.

Chacun de ces procédés présente des avantages et des inconvénients. Nous les avons indiqués précédemment (1). Pour nous résumer, nous dirons que, dans l'état actuel de la technique:

1) le procédé de cimentation, à condition qu'il s'adresse à des terrains cimentables uniquement, sera généralement le plus économique tout en donnant une sécurité suffisante; il devient impraticable dès qu'on rencontre des sables bouillants;

2) le procédé Honigmann a également l'avantage d'être économique, peut-être plus encore que

(1) Voir M. Biquet, — « Le Fonçage des Puits de Mine en terrains aquifères — Les principaux procédés spéciaux » Bibliothèque Scientifique Belge 1934.

le précédent, à condition qu'il s'adresse à des terrains tendres, que le diamètre utile du puits ne soit pas très grand et que le puits ne doive pas être creusé à trop grande profondeur. Mais il perd ces avantages d'autant plus rapidement qu'il rencontre plus de terrains durs, que le diamètre utile et la profondeur à creuser augmentent. Il arrive un moment où il coûte alors plus cher, non seulement que le procédé de cimentation, mais même que la congélation. Il ne peut d'autre part s'employer quand on a affaire à des terrains absorbants:

3) le procédé de congélation a contre lui son prix, surtout pour les faibles profondeurs; mais tandis que les deux précédents ne peuvent s'employer que dans des cas bien spécifiés, la congélation peut affronter tous les cas possibles: sables bouillants, terrains durs ou tendres, spongieux ou fissurés, absorbants ou contenant de l'eau stagnante ou courante ou même jaillissante, voire des solutions salines ou pétrolières, et donner malgré cela toutes les garanties possibles de réussite.

Comme nous l'avons dit plus haut, il peut concurrencer le procédé Honigmann dès qu'il s'agit de terrains durs, de grands diamètres et de grandes profondeurs.

En ce qui concerne la Campine, le procédé de cimentation ne peut entrer en ligne de compte puisqu'on y rencontre plusieurs niveaux, et très importants, de sables bouillants (à Zolder: 98 mètres, 111 mètres, 56 mètres et 12 mètres d'épaisseur) et une couche de tuffeau (à Zolder: 116 mètres d'épaisseur), terrains qui sont absolument incimentables.

Quant au procédé Honigmann, à partir de 500 mètres et même avant cette profondeur, il ne peut plus concurrencer le procédé de congélation ni comme prix ni comme vitesse d'avancement. On ne pourrait réellement penser à recourir à lui, malgré les difficultés énormes qu'il aurait à vaincre, que si le procédé de congélation se révélait inemployable.

Hureusement cette dernière supposition ne se réalisera pas comme nous allons le démontrer. C'est donc uniquement de la congélation que nous allons traiter.

PREMIERE PARTIE

THEORIE DE LA CONGELATION

Depuis les succès remportés en Campine belge par le procédé de la congélation, tout le monde connaît, au moins approximativement, cette méthode de fonçage. Elle consiste à former, autour de l'endroit où l'on doit creuser le puits, un mur de

terrain gelé à l'abri duquel on peut faire le creusement et le revêtement. Pour former ce mur de glace, on creuse sur un diamètre extérieur et concentrique à celui du puits à creuser un certain nombre de sondages, allant jusqu'à la base des terrains aquifères à traverser. Dans chaque sondage, on place un tube en acier, de 13 cm environ de diamètre, fermé à la partie inférieure; dans ce premier tube, on en place un second en acier également, de 50 à 60 mm de diamètre environ, et qui s'arrête à un mètre de la base du gros tube. Par le petit tube, on fait descendre une solution froide qui, arrivée au fond, remonte entre les deux tubes. Cette solution froide, par son contact avec le gros tube, refroidit celui-ci ainsi que le terrain aquifère qui l'entoure; il se forme, autour de chaque gros congélateur, un cylindre de glace qui grossit jusqu'à aller joindre le cylindre entourant le congélateur voisin.

Tous ces cylindres réunis constituent le mur de glace hermétique à l'abri duquel peut se faire le creusement. La solution froide est tout simplement une saumure de CaCl_2 ou MgCl_2 . Pour refroidir cette saumure avant départ et la refroidir à son retour des circuits congélateurs (en effet, en refroidissant le terrain, elle s'est elle-même réchauffée), on se sert de machines frigorifiques qui sont basées sur l'évaporation d'un gaz liquéfiable lequel est généralement soit l'ammoniaque, soit l'anhydride carbonique, l'anhydride sulfureux ou le chlorure de méthyle.

Dès 1885, M. Lebreton, alors encore étudiant, qui devait par la suite devenir Inspecteur Général des Mines de France, avait fait la théorie des phénomènes se passant autour d'un congélateur. Il considère la molécule de saumure m qui remonte entre les deux congélateurs et qui est soumise à deux actions : 1) refroidissement de la part de la saumure qui descend dans le petit congélateur; 2) réchauffement de la part du terrain entourant le gros congélateur (fig. 1), appelant :

- θ_0 la température de la saumure à l'entrée du petit congélateur,
- θ_1 la température de la saumure au fond du gros congélateur,
- θ_2 la température de la saumure à la sortie du gros congélateur,
- P le poids de saumure circulant à l'heure dans le congélateur,
- c la chaleur spécifique de la saumure,
- H la hauteur du congélateur (hauteur à congeler),
- q le rayon du petit congélateur,
- η l'épaisseur du petit congélateur,
- γ le coefficient de conductibilité du métal du petit congélateur (ici l'acier),
- π le rapport de la circonférence au diamètre,

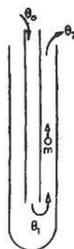


Fig. 1. — Circulation de la saumure dans un tube congélateur

M. Lebreton établit la relation suivante entre ces divers éléments :

$$\theta_1 - \theta_2 = (\theta_2 - \theta_0) \left(1 - \frac{\pi P \gamma}{c P \eta} H\right) \quad (A)$$

Pour établir cette formule, M. Lebreton a fait une hypothèse primordiale : c'est que la perte de température de la solution se fait suivant une loi linéaire, autrement dit que la température de la saumure à un niveau donné est fonction en chaque endroit, toutes choses égales d'ailleurs, de la distance de ce niveau à l'origine, c'est-à-dire de sa profondeur par rapport au sol.

Cette hypothèse est évidemment très vraisemblable, mais ce n'est qu'une hypothèse et elle méritait d'être contrôlée. C'est ce que nous avons pu faire en relevant les épaisseurs de glace trouvées le long d'un congélateur fonctionnant du haut en bas dans de l'eau pure, qui n'est après tout qu'un terrain à 100 % d'eau, mais qui présente l'avantage d'être homogène et d'avoir par conséquent, du haut en bas du congélateur, les mêmes caractéristiques au point de vue conductibilité calorifique. Les résultats obtenus ayant été trouvés parfaitement conformes à la théorie, nous estimons avoir le droit de considérer la formule de Lebreton comme exacte.

Si on considère la formule (A)

$$\theta_1 - \theta_2 = (\theta_2 - \theta_0) \left(1 - \frac{\pi P \gamma}{c P \eta} H\right)$$

on en déduit que, si le froid reçu par la molécule m de la part du congélateur intérieur se transmet instantanément et intégralement au terrain, on aura $\theta_2 = \theta_1$, c'est-à-dire que le rempart de glace formé autour du congélateur sera un cylindre.

Le premier terme de l'équation devient en ce cas égal à 0.

Comme $(\theta_2 - \theta_0)$ est essentiellement différent de zéro, il vient :

$$1 - \frac{\pi P \gamma}{c P \eta} H = 0$$

$$\text{D'où :} \quad H = \frac{c P \eta}{\pi P \gamma} \quad (B)$$

formule qui donne la profondeur à laquelle on peut obtenir le cylindre de terrain gelé autour d'un congélateur.

On peut voir que, si H est inférieur à cette valeur, la forme du rempart de glace est celle d'un cône droit; au contraire, si H est supérieur à cette valeur, la forme du rempart de glace est un cône renversé dont la génératrice est d'autant plus inclinée que la profondeur devient plus grande.

Or, si l'on donne à c , P , η , q et γ les valeurs habituelles de la pratique, on tire de cette formule $H =$ environ 60 mètres.

Ainsi donc, il s'ensuivrait qu'il est impossible de creuser avec sécurité en-dessous de 60 mètres de profondeur, la sécurité nécessitant au moins, semble-t-il, le cylindre autour de chaque congélateur.

Nous avons nous-même montré autrefois (2) que la transmission du froid se fait moins rapidement dans la glace, et surtout dans l'eau, que dans le terrain sec. La conséquence de ceci se fait surtout sentir avec le temps. Et c'est grâce à ce dernier phénomène qu'on a pu arriver à congeler à plus grande profondeur avec la sécurité voulue. Mais cela s'est fait au détriment du prix de revient, puisque la congélation a dû durer plus longtemps. On a pu cependant raccourcir cette durée en composant la colonne de petits congélateurs de trois ou quatre parties à diamètre croissant vers le bas. La molécule de saumure descendante, circulant plus rapidement à la partie supérieure, avait moins de temps pour céder son froid à la molécule remontant entre les deux congélateurs et, arrivant donc plus froide au fond, voyait son action augmenter à la partie inférieure; en autres termes, on avait ainsi redressé la génératrice du cône renversé formant rempart de glace autour d'un congélateur.

Mais jusqu'où pourra-t-on, avec succès, employer ces mêmes procédés? Etudions d'abord le cas où nous aurions à creuser un puits de 1.000 m de profondeur et de 6,00 m de diamètre utile.

Nous prendrions comme congélateurs des tubes en acier de 135-150 mm et, comme petits congélateurs, des tubes en acier de 50-60 mm. La section de passage dans le petit congélateur est de 19,5 cm² environ et celle de la couronne entre les deux tubes, de 122 cm² environ.

Reprenons cette formule (B)

$$H = \frac{c P \eta}{\pi P \gamma}$$

Il s'agirait d'obtenir une plus grande valeur de H , en agissant sur les variables du second membre de l'équation. On ne peut guère augmenter c et P au delà de ce qui se fait habituellement et π est une constante. On a toujours considéré jusqu'à maintenant γ comme une constante, parce que c'est le coefficient de conductibilité calorifique de l'acier. Il reste η et q qu'on peut faire un peu varier, mais ces valeurs travaillent en sens inverse l'une de l'autre.

Voyons cependant ce qu'on obtiendrait en augmentant la valeur de P . Avec une pression de 10 kg aux pompes de circulation de la saumure, nous pourrions passer au maximum 10,7 m³ de saumure à l'heure dans chaque congélateur, soit un poids de 13.500 kg environ, et cela donnerait une vitesse de circulation de 1,50 m par seconde dans le petit congélateur. Dans ces conditions, jusqu'à quelle profondeur peut-on obtenir un cylindre autour de chaque congélateur? En appliquant la formule (B), on trouve :

$$H = \text{environ } 150 \text{ mètres.}$$

La théorie de Lebreton permet de déterminer quel sera le rayon de la section du rempart de glace autour d'un congélateur à une profondeur y en fonc-

tion du rayon à la surface; il est donné par la formule :

$$r_y = r_0 \times e^{\alpha h} \quad (C)$$

dans laquelle

- r_y = rayon à la profondeur y
- r_0 = rayon à la surface
- e = base des logarithmes népériens
- h = profondeur de la congélation

$$\alpha = \frac{2 K \pi}{c P} \times \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_2 - \theta_0} \quad (D)$$

Dans cette dernière formule, K = la conductibilité moyenne du terrain qu'on prend généralement égale à 2.

Appliquons ces formules (C) et (D) dans les conditions indiquées ci-dessus et cherchons le rayon à 1.000 mètres de profondeur pour un rayon de 1 m à la surface. On trouve :

$$\alpha = -0,0095 \quad r_{1000} = 0,0007$$

Ces résultats sont absolument décevants.

Pourrait-on aller plus loin dans ce sens?

Avec une pression aux pompes de circulation de saumure de 26 atmosphères, on pourrait envoyer à l'heure 21 m³ de saumure dans chaque congélateur, soit un poids de 26.250 kg. Ce sont là des conditions déjà bien anormales. Toutes les tuyauteries à saumure seraient soumises à cette pression de 26 atmosphères. Quelle épaisseur devraient-elles avoir et que de difficultés à en maintenir les joints étanches! Et cependant les résultats obtenus ainsi n'en seraient guère améliorés. La formule (B) nous donnerait $H = 240$ m.

Quant au rayon du rempart de glace autour d'un congélateur pour un rayon de 1 mètre à la surface, il serait à 1.000 m de 0,113 m. Ce n'est évidemment pas là une solution. Même en tenant compte des correctifs cités précédemment, il faudrait des années pour former le rempart de glace. Oserait-on affronter le problème avec de telles perspectives?

Congélation fractionnée.

Une autre façon de résoudre la question se présente d'abord à nous. Les morts-terrains qui recouvrent le terrain houiller ne sont pas composés uniquement de sables bouillants. Nous connaissons ceux qui furent rencontrés dans les puits creusés et qui se retrouveront avec quelques changements d'épaisseurs dans les futurs puits à creuser.

A Helchteren-Zolder par exemple, il y avait trois couches de sables bouillants :

- 1) de 5 à 108 m avec niveau hydrostatique à 2,00 m de la surface,
- 2) de 178 à 201 m avec niveau hydrostatique à 17,00 m de la surface,
- 3) de 588 à 597 m avec niveau hydrostatique à 95,00 m de la surface, et en outre une couche de tuffeau de 350 à 450 m, avec niveau hydrostatique à 16,00 m de la surface.

(2) Voir référence ci-dessus.

Quand nous étames à étudier la congélation de deux puits à travers ces terrains, nous avons pensé que l'on pourrait résoudre le problème de trois façons différentes. Les sondages étant faits et garnis de gros congélateurs, on peut soit : a) descendre les petits congélateurs à 1 m du fond; c'est la congélation ordinaire; soit b) descendre les petits congélateurs jusqu'à 300 m pour congeler les deux premiers niveaux; ceux-ci congelés, on peut commencer le creusement, tandis qu'on descend les congélateurs à 620 m pour congeler les deux autres niveaux; soit c) au lieu de descendre les congélateurs à 620 m quand on commence le creusement, les porter d'abord à 470 m pour congeler le troisième niveau et, celui-ci fermé, les descendre à 620 m.

Le calcul prouve que, dans le premier cas, c'est-à-dire la congélation en une seule passe, si l'on dispose d'une puissance frigorifique de 1.000.000 de frigories/heure à -20° , la durée de la congélation est d'un peu plus d'un an. Si l'on fractionne en deux passes (cas b), la durée est ramenée à 8 1/2 mois; si l'on fractionne en trois passes (cas c), la durée devient 7 1/2 mois (5). De plus, alors qu'on ne peut commencer le creusement dans le premier cas qu'après formation du mur complet, dans les deuxième et troisième cas, on peut le commencer après fermeture des deux premiers niveaux, soit après trois mois.

Cela est évidemment intéressant. Toutefois, cet avantage de commencer plus tôt le creusement se réduira généralement à peu de chose; on sait en effet que, pour s'assurer de la fermeture du mur de glace, il suffit de suivre les variations du niveau d'eau dans un sondage disposé au centre du puits et non muni de colonne congélatrice. Dans le cas de plusieurs niveaux aquifères, ce sondage est pourvu de plusieurs tubages concentriques dont chacun atteint un de ces niveaux, le plus intérieur allant jusqu'au niveau le plus bas. Chacun de ces tubages, grâce à une frette étanche à la base, sépare les divers niveaux aquifères.

On sait qu'un litre d'eau en se gelant donne environ 1,1 litre de glace. Dès que le mur de glace est fermé, l'augmentation de volume, due à la congélation de l'eau restant emprisonnée, refoule l'eau non encore congelée dans le tube central prévu ad hoc et dans lequel on voit le niveau monter au fur et à mesure du renforcement du mur de glace.

On peut donc voir les divers niveaux se fermer l'un après l'autre.

On devrait donc, si l'on fait la congélation fractionnée et si l'on commence le fonçage après fermeture du premier niveau, maintenir dans le puits en creusement, par des poutrelles placées judicieusement, les tubages du sondage central qui atteignent les niveaux inférieurs. Cela deviendrait fort encombrant et coûteux si l'on devait faire ce travail sur des hauteurs considérables.

Cette solution n'est donc pas l'idéale.

(5) A Zolder, on a fait la congélation en une passe on porta la puissance à 1.500.000 frigories/heure à -20° et la fermeture dans 7 1/2 mois.

Reprenons notre formule (B).

$$H = \frac{c P \eta}{\pi r \gamma}$$

Il s'agit toujours de rechercher comment on pourrait obtenir une très grande valeur pour H. Nous avons vu qu'agir sur P ne conduit pas à grand-chose, qu'on a toujours considéré γ comme une constante, vu que c'est le coefficient de conductibilité calorifique de l'acier, et qu'enfin η et ϱ ne peuvent guère varier et travaillent d'ailleurs en sens inverse l'un de l'autre.

Cependant nous avons pensé à agir à la fois sur ces trois variables en formant le petit congélateur de deux tubes concentriques de 50-60 mm et de 70-80 mm respectivement. Ainsi le rapport η/ϱ passait de la valeur $5/60 = 1/12 = 4/48$, à $15/40 = 3/8 = 18/48$. Déjà de ce fait, la valeur de H était multipliée par 4,5. De plus la couche d'air de 5 mm stagnante entre les deux tubes devait réduire considérablement la valeur de γ , à moins de (1/10) peut-être de celui de l'acier. En modifiant ainsi ces diverses variables, on multipliait par 45 la valeur de H, c'est-à-dire la profondeur à laquelle on pouvait obtenir le cylindre autour d'un congélateur, et atteindre ainsi plus de 2.000 mètres.

Cette solution, très attrayante au premier abord, le devenait beaucoup moins après un examen approfondi. En effet, il fallait, pour obtenir les résultats désirés, être sûr que les deux petits tubes formant le petit congélateur se placeraient bien concentriquement l'un par rapport à l'autre. Sans doute, pouvait-on réaliser la chose au moyen de manchons de jonction spéciaux entre ces deux tubes. Mais outre que cela allait nécessiter des manœuvres très compliquées au montage, cela présentait l'inconvénient de donner à ces endroits une surépaisseur toute en acier, à travers laquelle les frigories pouvaient passer très facilement formant en définitive, autour du congélateur, un rempart en grains de chapelet. Et cet inconvénient est très grave car il se pourrait, de ce fait, que certains volumes de terrains aquifères soient entièrement enfermés dans la glace. La congélation se continuant, on créerait à ces endroits des pressions formidables sur les congélateurs, ce qui écraserait ceux-ci; d'où fuites de saumure avec toutes leurs conséquences pouvant aller jusqu'à rupture du mur de glace et inondation du puits.

Là n'était pas la solution. Il fallait constituer le petit congélateur de façon que la conductibilité fût identique du haut en bas tout en étant la plus faible possible, et en même temps d'une matière assez résistante pour que la section supérieure fût capable de supporter le poids d'une colonne de 1.000, 1.500, voire 2.000 mètres et plus. Ainsi qu'on le verra par les expériences décrites ci-après, nous avons trouvé la solution en constituant le petit congélateur d'un tube en acier de 60-70 mm, garni intérieurement d'une couche de 6 mm d'un dérivé spécial du caoutchouc; un tube ainsi constitué a un coefficient de conductibilité 34 fois moindre que celui de l'acier.

D'autre part : η/ϱ devient $11/70 = 66/420$ au lieu de $5/60 = 35/420$.

Le problème est donc résolu, car H est multiplié par $(66 \times 34)/35 = 63$ et atteint 3.780 mètres.

Expériences réalisées.

Comme dit plus haut, il s'agissait donc de trouver pour le congélateur intérieure une matière ayant une résistance à la traction suffisante pour que la section supérieure puisse supporter le poids de la colonne entière et dont, d'autre part, le coefficient de conductibilité calorifique fut le plus petit possible.

Nous avons pensé tout d'abord à constituer l'appareil d'expérience d'un bac en tôle complètement calorifugé sur toutes ses faces. Des rainures dans lesquelles on pouvait glisser les matières à essayer sous forme de plaques d'un mètre sur un mètre pouvaient séparer ce bac en deux compartiments identiques, munis chacun d'un agitateur également identique. Dans l'un des compartiments on pouvait maintenir un liquide, de l'eau par exemple, à une température déterminée et mesurer la variation des températures de l'autre. Il semblait que toutes les influences extérieures étant exactement les mêmes dans les deux bacs, on pouvait ainsi facilement déterminer le coefficient de conductibilité calorifique de la matière de la plaque séparatrice.

En réalité, cet appareil ne convenait nullement. Tout d'abord il était très compliqué de maintenir exactement pendant toute la durée de l'expérience la même température, supposons 50 ou 55° , dans un des compartiments, tandis qu'on mesurait dans l'autre l'élevation de température d'une eau qui au début avait la température ambiante. En second lieu une erreur, même faible, dans la lecture des températures modifiait les résultats d'une façon importante, vu la masse d'eau, d'environ 500 litres, contenue dans chaque compartiment; ainsi 1/10 de degré d'erreur représentait 50 calories.

Aussi, nous ralliant aux conseils judicieux qui nous ont été donnés, avons-nous pris d'autres dispositions (fig 2.)

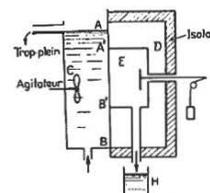


Fig. 2. — Dispositif expérimental pour la mesure des coefficients de conductibilité thermique de matériaux divers en plaques.

La tôle AB soumise à l'essai sert de paroi commune à deux réservoirs C et D.

C contient de l'eau maintenue à température constante par une circulation d'eau de la distribution.

D contient de la glace fondante à 0° .

On mesure le flux de chaleur traversant la paroi AB' de section $0,5 \times 0,5$ m. le cadre restant de paroi AB de 1×1 m servant d'anneau de garde.

Le réservoir E contient de la glace sèche à 0° et la mesure du flux de chaleur, ayant traversé AB', résulte de la quantité d'eau de fusion recueillie en H.

Le réservoir D est calorifugé.

Lors des premières mesures, la glace sèche déposée en E se trouvait sous forme de fragments plus ou moins gros; l'agitateur indiqué sur la figure n'existait pas. On fit d'abord des mesures sur une plaque d'acier afin de vérifier si les résultats obtenus concorderaient avec les résultats connus pour l'acier. C'était en somme la vérification de la valeur de l'appareil.

Les valeurs trouvées furent beaucoup trop faibles, la valeur de γ était de l'ordre de 0,675 (en calories par m^2 sur 1 m d'épaisseur pour 1° C de différence de température). On remarqua alors :

- 1) que la température en C était peu uniforme, et notamment que le long de la paroi froide glissait vers le bas une lame d'eau de plus en plus froide; ce fut la raison de l'adjonction de l'agitateur placé dans la cuve C;
- 2) la fusion de la glace en E était beaucoup plus active à la partie supérieure et nulle ou presque nulle à la partie inférieure.
- 3) la face de la tôle en AB' n'était que partiellement en contact avec la glace; l'air compris entre les morceaux de glace constituait une résistance thermique très considérable vis-à-vis de celle de la tôle.

Pour diminuer ce dernier inconvénient, la glace placée en E a été constituée par un bloc unique. Dès l'établissement du régime, le débit d'eau de fusion, fut très régulier, mais la valeur de γ trouvée égale à 1,358 était encore beaucoup trop faible.

On constata la persistance de l'inconvénient exposé au 2^o. Ceci put s'expliquer par l'existence d'une lame d'eau de fusion entre la tôle et le bloc de glace; cette lame s'écoule vers le bas et son importance augmente du haut vers le bas. Elle a elle-même une résistance thermique qu'on ne peut pas apprécier à cause de son mouvement et de son épaisseur inconnue et variable, mais qui est considérable vis-à-vis de celle de la tôle. Pour chercher à remédier à cet inconvénient, on a ajouté le dispositif visible sur la figure, qui est destiné à appuyer d'une façon continue le bloc de glace contre la paroi expérimentée, et ce, avec un effort d'une dizaine de kilos. Les débits d'eau de fusion furent extrêmement réguliers. Mais la valeur de γ trouvée égale à 4,33 restait encore trop faible et, d'autre part, le régime de fusion triangulaire subsistait.

On recommanda les expériences dans les mêmes conditions, mais avec un bloc de glace de hauteur réduite, de même largeur. Pour une hauteur de 17,5 cm (soit donc une surface de fusion de $50 \times 17,5$ cm), γ devint 7,14, mais toujours avec une fusion sensiblement triangulaire. Pour une hauteur de 5 cm, γ fut trouvé égal à 11,8 avec un régime de fusion très sensiblement rectangulaire.

Il semble qu'il y aura là une erreur systématique qu'il ne sera pas possible d'éliminer complètement. Il est toutefois à observer que, si la valeur de 11,8 est encore un peu trop faible vis-à-vis des valeurs citées habituellement :

- il s'agit d'une tôle brute dont les deux faces portent toujours de l'oxyde de laminage;
- cette tôle est en acier ordinaire du commerce et peut présenter une certaine zone de ségrégation;
- les valeurs qu'on cite habituellement pour γ sont généralement le coefficient de passage air à acier, tandis qu'ici il s'agit du passage eau à acier qui est moins connu.

Quoi qu'il en soit, nous avons estimé que notre appareil réaliserait des conditions d'exactitude très suffisantes pour le but industriel poursuivi. Nous passâmes donc à l'essai de tôles garnies d'un dérivé du caoutchouc, espèce d'ébonite spéciale, fabriqué à notre demande. Nous l'appelons « ébonite » dans ce qui suit. Les résultats obtenus furent les suivants :

A. Tôle garnie du côté glace d'une couche de 3 mm d'ébonite. La mesure fut faite avec un bloc de glace de 48 cm de largeur et 15 cm de hauteur. On trouva : γ total = 0,56.

On peut tirer de là, par la formule connue, la valeur de γ ébonite

$$\gamma_{\text{total}} = \frac{e_{\text{total}}}{\frac{e_{\text{acier}}}{\gamma_{\text{acier}}} + \frac{e_{\text{ébonite}}}{\gamma_{\text{ébonite}}}}$$

$$\text{ou } 0,56 = \frac{8}{\frac{5}{11,8} + \frac{3}{\gamma_{\text{ébonite}}}}$$

$$\text{D'où : } \gamma_{\text{ébonite}} = \frac{3}{\frac{8}{0,56} - \frac{5}{11,8}} = \text{environ } 0,216$$

Rem. : section de la glace après essai : légèrement trapézoïdale.

B. Tôle recouverte sur les deux faces de 3 mm d'ébonite. Le bloc de glace a, comme à l'expérience précédente, 48 cm de largeur sur 15 cm de hauteur. On trouva : γ total = 0,326.

En appliquant les valeurs trouvées plus haut, on aurait :

$$\gamma_{\text{total}} = \frac{e_{\text{total}}}{\frac{e_{\text{acier}}}{\gamma_{\text{acier}}} + \frac{2 \times e_{\text{ébonite}}}{\gamma_{\text{ébonite}}}} = \frac{11}{\frac{5}{11,8} + \frac{6}{0,216}} = \text{environ } 0,378$$

C. Tôle recouverte de 6 mm d'ébonite sur une face (côté glace).

On a trouvé $\gamma = 0,354$, donc pratiquement la même valeur que dans l'essai précédent.

En résumé de ces expériences, on peut donc admettre :

- γ acier 5 mm = 11,8
- γ acier 5 mm + ébonite 3 mm = 0,56 soit environ 21 fois moins que l'acier seul
- γ acier 5 mm + ébonite 6 mm = 0,350 soit environ 34 fois moins que l'acier seul.

Application.

Passons à l'application des résultats ci-dessus obtenus. Une première remarque s'impose. Nous venons de voir que le coefficient γ pour l'acier était de 11,8. Or lorsque les premières études sur la congélation furent faites (4), on avait adopté pour ce coefficient la valeur de 4. Les expériences à ce sujet n'étaient pas très nombreuses et probablement n'avaient-elles pas été faites avec tout le soin voulu. Depuis lors, on ne s'inquiéta pas beaucoup de rechercher ce qu'il en était et l'on continua de se servir de cette valeur. C'est avec elle que furent faits les calculs dont les résultats ont été donnés plus haut.

Il est toutefois à remarquer que cette valeur de γ était trop faible et que, si nous avions pris 11,8, nous aurions obtenu des résultats encore plus défavorables dans les calculs précédemment exposés.

Voyons les résultats que nous obtiendrions en employant comme petits congélateurs des tubes en acier garnis d'ébonite. Nous nous remettons dans les mêmes conditions qu'indiqué précédemment et que nous rappelons : 10 kg de pression aux pompes à saumure, soit une circulation de 10,7 m³, ou 13.500 kg environ par heure et par congélateur d'une saumure à 1,25 de densité dont la chaleur spécifique est de 0,691.

1^{er} cas. — Tubes en acier garnis intérieurement de 3 mm d'ébonite.

La profondeur à laquelle on peut atteindre le cylindre comme rempart de glace autour de chaque congélateur est de 881 mètres.

En dessous de cette profondeur, on obtiendra donc le cône renversé.

Puits de 1.000 m. — Pour 1 m de rayon à la surface, on aura à 1.000 m : 0,820 m.

Puits de 1.500 m. — Pour 1 m de rayon à la surface, on aura à 1.500 m : 0,240.

Puits de 2.000 m. — Pour 1 m de rayon à la surface, on aura à 2.000 m : 0,033 m.

2^e cas — Tubes en acier garnis intérieurement de 6 mm d'ébonite.

La profondeur à laquelle on peut atteindre le cylindre comme rempart de glace autour de chaque congélateur est de 1.414 mètres.

En dessous de cette profondeur, on obtiendra donc un cône qui sera droit pour les profondeurs moindres que 1.414 m et renversé pour les profondeurs supérieures.

(4) a) Annales des Mines de France 1885, 8^e série tome VIII — Mémoire de M. Lebréton.

b) Annales des Mines de France avril 1908.

Puits de 1.000 m. — Pour 1 m de rayon à la surface, on aura à 1.000 m : 1,355 m.

Puits de 1.500 m. — Pour 1 m de rayon à la surface, on aura à 1.500 m : 0,880 m.

Puits de 2.000 m. — Pour 1 m de rayon à la surface, aura à 2.000 m : 0,180 m.

On voit par ce qui précède que l'on pourra, sans la moindre appréhension, envisager des congélations aux profondeurs de 1.000 et 1.500 mètres, et même un peu au delà.

En ce qui concerne le cas de 2.000 mètres, et nous n'y sommes pas encore, il suffira d'augmenter un peu la pression aux pompes, donc le poids de saumure, et d'agir encore un peu sur les rayons et épaisseurs des petits congélateurs pour résoudre le problème. (5)

Quelques points délicats.

Nous devons cependant attirer l'attention sur le fait qu'il restera encore certains points délicats qu'il ne faudra pas perdre de vue :

1. — Verticalité des sondages :

Tout ce qui a été dit précédemment suppose que les sondages où l'on placera les congélateurs soient parfaitement verticaux. Or un sondage dévie toujours plus ou moins fort. Il s'agira donc plus que jamais de surveiller ce point.

Nous pensons qu'il est possible de réussir en prenant certaines précautions :

a) placer les tubes guides de démarrage, qu'on cimenter dans le terrain, le plus profondément possible et exactement verticaux;

b) employer pour les sondages le système Rotary avec matresses-tiges aussi lourdes et aussi longues que possible;

c) n'employer que des tiges absolument rectilignes, surveiller ce point de très près et redresser immédiatement toute tige légèrement courbée avant de s'en resservir;

d) surveiller de très près les appareils de sondage et rattraper tout de suite tout jeu qui se présente du fait de l'usure dans les coussinets, etc...;

e) suivre le sondage à la verticalité; c'est-à-dire en mesurer souvent la verticalité, par exemple tous les 100 ou 200 mètres (cela dépend des terrains et de circonstances diverses qui indiqueront rapidement, après les premiers sondages, le nombre de mesures à faire) et redresser le sondage lorsque cela s'avère nécessaire. Il existe à l'heure actuelle des appareils parfaitement au point pour ces mesures de verticalité, par exemple le téléclinomètre Denis-Foraky et l'appareil Martienssen de la Ge-

sellschaft für Nautische Instrumente à Kiel. (6)

2. — Quoi qu'on fasse, il y aura toujours un certain enchevêtrement des sondages entre le sol et la profondeur à laquelle on doit congeler et il peut, de ce fait, se former des poches de terrain non gelé complètement entourées par du terrain gelé. La congélation progressant, comme la glace prend environ 10 % de volume de plus que l'eau qui a servi à la faire, il se produira dans ces poches des pressions formidables qui pourront écraser les tubes congélateurs et provoquer ainsi des fuites de saumure avec toutes leurs conséquences pouvant aller jusqu'à la rupture du mur de glace. Pour parer à cette éventualité, il n'y a qu'un moyen; c'est de faire la congélation par le procédé dit méthode rationnelle (7).

3. — Pour obtenir les grandes épaisseurs de mur de glace nécessaires au fond du puits, il faudra évidemment augmenter le nombre de sondages et placer ceux-ci en quinconce sur deux circonférences concentriques. Ce sera une raison de plus pour n'employer que la méthode rationnelle dont il vient d'être parlé.

4. — Epaisseur du cuvelage. Il est évident que l'épaisseur à donner au cuvelage augmente avec la profondeur quand il est soumis à des pressions hydrostatiques augmentant avec celle-ci. Et ce sera le cas en Campine notamment, où la couche de sable hervien bouillant se trouve immédiatement au-dessus du Houiller. A Zolder, les pièces d'un cuvelage simple immédiatement au-dessus du Houiller atteignaient déjà 170 mm d'épaisseur de fonte. Pourra-t-on aller beaucoup plus loin dans cette voie ?

Ceci n'est plus un problème de fonçeur de puits, mais de métallurgiste, et nous sommes incompetents. Toutefois nous estimons que l'étude magistrale de M. le Professeur Denoël à ce sujet (8) permettra de résoudre le problème, et nous pensons que la solution adéquate se trouvera vraisemblablement dans le cuvelage double avec interposition de béton armé et liaison par profilés entre les deux cuvelages. Cependant, là également, il y aura certaines précautions spéciales à prendre. Quoi qu'on fasse, il est vraisemblable qu'il se produira toujours quelques fissures dans le béton entre les deux surfaces, si pas au début, tout au moins après un certain temps, par exemple suite à des mouvements sismiques. D'autre part, les joints du cuvelage ne sont pas d'une étanchéité parfaite. L'eau extérieure passera donc entre

(6) Ces précautions spéciales ont été imaginées et employées pour la première fois, par notre collègue et ami M. Gustave Lemaitre de la Société Foraky, aux sondages de congélation des puits d'Helchteren et Zolder avec un succès remarquable.

(7) a) Biquet M. Le fonçage des puits de mine en terrains aquifères. — Bibl. Scient. Belge Thône Editeur Liège 1935.

b) Radar E. — Bulletin des Ingénieurs de Louvain — n° du 15-9-1927.

(8) Denoël L. Les cuvelages. Théories et applications. — Bibl. Scient. Belge. — Thône Editeur Liège, 1935.

(5) Il est à remarquer que ce procédé est intéressant, non seulement pour les fonçages de puits à grandes profondeurs, mais également pour les autres, étant donné qu'il permet de diminuer la durée de la formation du mur de glace et d'augmenter la sécurité de celui-ci.

les deux enveloppes, remplira les fissures et l'on peut très bien imaginer le moment où le cuvelage intérieur se trouvera sous la pression totale extérieure pour laquelle il n'a pas été calculé.

Pour se mettre à l'abri des conséquences désastreuses qui pourraient résulter d'un tel état de choses, on pourrait remplacer les bouchons habituels de fermeture des trous de cimentation par des bouchons spéciaux. (fig. 3, b)

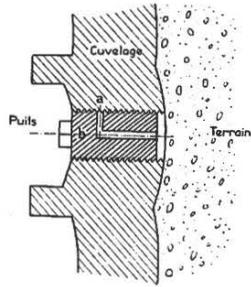


Fig. 3. — Bouchon de décharge dans un cuvelage.

En dévissant de temps à autre ces bouchons de la quantité nécessaire à découvrir l'ouverture (a) on constaterait qu'il y a de l'eau derrière le cuvelage et quelle est sa pression. On pourrait dès lors procéder à une cimentation du béton entre cuvelages quand la chose s'avérerait utile.

DEUXIEME PARTIE ESSAIS DE RESISTANCE SUR

SABLES BOULANTS ET LIMONS CONGELÉS

Dans l'ouvrage cité ci-dessus, Monsieur le Professeur Denoël déplorait qu'on n'eût pas fait de recherches suffisantes concernant la résistance des terrains gelés. Nous avons voulu parer, au moins en partie, à cette carence et, grâce au subside que nous a accordé le Fonds National de la Recherche Scientifique, nous avons procédé à des expériences à ce sujet. Elles ont été entièrement réalisées, à notre demande, dans les Laboratoires du Génie Civil de l'Université de Liège, sous la haute direction du Professeur-Directeur de ces Laboratoires, Monsieur le Recteur Campus, et la surveillance constante de son Chef des Travaux, Monsieur le Professeur Dantine.

I. — Introduction.

A. Programme des essais :

Le programme dont les résultats d'essais vont suivre comportait l'étude de la résistance :

- 1) à la compression rapide;
 - 2) à la compression lente;
- de cubes congelés constitués :
- 1) de sable de Mol (M);

2) de limon Yprésien (Y);

3) de limon provenant du Parc des Instituts Universitaires du Val-Benoit (L);

aux températures de -5 , -10 , -15 et -20° C.

On a aussi étudié la résistance à la compression rapide et à la compression lente de cubes de glace.

L'étude des sables et du limon a été effectuée à deux teneurs en eau différentes : une première série de cubes était confectionnée avec une faible teneur en eau, une deuxième série avec une forte teneur en eau. Nous avons choisi, comme faible teneur en eau, l'humidité optimum suivant l'essai Proctor, c'est-à-dire celle correspondant à la compacité maximum pour un mode de damage donné. La forte teneur en eau a été choisie aussi grande que possible et a été déterminée suivant la méthode qui sera exposée plus loin (humidité maximum).

B. Confection des cubes de terrain congelé.

On tamise les sables sur le tamis de 2,36 mm d'ouverture de maille, afin d'éliminer certains corps non sableux (tourbe, coquillages).

Le limon suffisamment fin et propre ne requiert pas de tamisage, mais uniquement un broyage convenable après séchage à l'air pendant plusieurs jours.

On fabrique des cubes de 70,7 mm de côté, soit 50 cm² de section. Dans le cas des cubes à forte humidité, le mélange de terre et d'eau, rendu bien homogène, est simplement versé dans le moule, tout damage étant impossible puisque la terre est à l'état liquide.

Dans le cas de faible humidité, le mélange terre-eau est placé dans le moule en trois couches, chacune étant damée de façon à obtenir la compacité désirée.

Les moules ont leurs faces intérieures usinées et reposent sur un tronçon de poutrelle d'acier. Les parties en contact avec la terre sont enduites de vaseline afin d'éviter toute adhérence du cube congelé et d'éviter tout départ d'eau avant congélation. Au moment de la confection des cubes, les moules sont retirés avec leur support de la salle froide à -10° C, où ils ont séjourné jusqu'à équilibre de température.

Pour congeler les cubes à la température désirée, on procède de la façon suivante : les moules et leur support sont placés, à l'intérieur de la chambre froide réglée à la température voulue, dans un bac contenant de la saumure et séjournant constamment dans la chambre. Le support des moules est en partie immergé de façon que la saumure n'atteigne pas directement les moules.

La face supérieure des moules est couverte d'une plaque de verre à 18° C afin que la congélation du cube progresse de bas en haut. Les cubes sont laissés avec leur moule dans la chambre froide, à la température désirée, au moins pendant 24 heures.

Les cubes sont démoulés et pesés environ une demi-heure avant l'essai, puis replacés dans la chambre froide pour reprendre la température de celle-ci.

C. Préparation des cubes de glace :

Ceux-ci sont préparés par congélation, à l'intérieur de la chambre froide, dans de petits moules

cubiques et étanches de 70,7 mm de côté. Le mame-lon qui se forme pendant la congélation à la face supérieure est enlevé par frottement de la face supérieure sur un morceau de meule douce. Le cube est démoulé par arrosage des parois du moule au moyen d'eau alimentaire.

D. Propriétés des matériaux utilisés.

La granulométrie des sables et limons a été déterminée par tamisage et lévigation (voir tableau I).

L'essai Proctor a été effectué pour déterminer l'« humidité optimum Proctor » de chaque matériau et adopter celle-ci pour la confection des cubes à faible teneur en eau.

TABLEAU I.

		Sable de Mol		Sable Yprésien		Limon	
Analyse minéralogique							
Carbonates	%	0,97		15,21		5,82	
Oxydes libres	%	0,28		0,29		1,30	
Kaolinite	%	3,93		3,84		17,30	
Silice libre, mica, feldspaths.	%	94,82		82,66		75,58	
Analyse granulométrique							
Lévigation.							
		d	%	d	%	d	%
Diamètre des grains d	mm			0,0011	6,10	0,0011	25,00
grains de diamètre inférieur à d	%	0,0020	2,5	0,0024	8,64	0,0026	28,35
		0,0058	2,5	0,0053	11,17	0,0051	34,18
		0,0082	3,0	0,0074	12,45	0,0072	38,32
		0,0116	3,0	0,0104	12,95	0,0100	43,70
		0,0200	3,0	0,0178	14,00	0,0168	53,70
		0,0315	3,5	0,0281	14,70	0,0258	64,40
		0,0445	3,5	0,0395	15,75	0,0351	76,60
Tamisage							
		m	%	m	%	m	%
Ouverture des mailles m	mm	0,060	94,1	0,060	80,00	0,060	10,87
Refus cumulés en % du poids sec	%	0,075	93,5	0,075	78,95	0,075	6,80
		0,120	85,6	0,120	67,05	0,120	2,39
		0,150	76,1	0,150	59,35	0,150	1,33
		0,200	44,73	0,200	42,50	0,200	0,60
		0,250	19,00	0,250	16,45	0,250	0,12
		0,490	0,85	0,490	1,50		
		0,750	0,08	0,750	0,75		
		1,020	0,05	1,020	0,65		
				2,000	0,45		
Essai Proctor							
Humidité optimum Proctor	%	14,8		12,87		17,68	
Compacité maximum C _{max}		0,631		0,668		0,635	
Poids spécifique apparent δ_a	kg/dm ³	1,920		2,028		2,050	
Poids spécifique absolu	kg/dm ³	2,65		2,60		2,74	
Humidité maximum (sur sec)	%	23,0		25,0		40,0	

Nous désignons par

- ϵ : l'humidité (% en poids du produit sec);
- δa : le poids spécifique apparent en kg par dm³;
- δr : le poids spécifique absolu ou réel;
- C : la compacité ou le rapport du volume réel au volume apparent.

On sait que

$$C = \frac{\delta a}{\delta r} \times \frac{100}{100 + \epsilon}$$

Pour déterminer les plus fortes teneurs en eau que chaque matériau peut contenir (humidité maximum), nous avons procédé de la façon suivante.

On mélangeait le matériau avec un excès d'eau. Ce mélange était placé dans un vase qu'on vibrait pour expulser l'eau en excès du mélange. On déterminait alors la teneur en eau du mélange ainsi traité et celle-ci était considérée comme étant l'humidité maximum cherchée (tableau I).

II. — Essais de compression rapide.

Comme nous l'avons déjà signalé, on a fabriqué, pour chaque matériau, des cubes congelés à deux humidités différentes.

Pour la faible humidité (humidité optimum Proctor) on a fabriqué, en plus des cubes de compacité maximum, d'autres cubes de compacité moindre, obtenus en réduisant le damage.

A. Mode opératoire :

Les cubes congelés sont comprimés entre les plateaux parallèles d'une presse hydraulique, située dans la chambre froide réglée à la température désirée. La commande de la presse et le dynamomètre mesurant les efforts sont situés à l'extérieur de la chambre froide. Pendant la durée des essais, l'opérateur occupé dans la chambre froide ne quitte pas celle-ci pour éviter tout réchauffement. Il est cependant en communication téléphonique constante avec l'opérateur manœuvrant le dynamomètre.

On a essayé d'obtenir pour chaque cube la même durée d'essai, de l'ordre de 10 secondes, étant donné que les essais préliminaires ont montré que celle-ci avait une certaine influence sur la résistance à la rupture. La durée d'essai, qui est l'intervalle de temps qui sépare le début de l'application de la charge (départ de l'aiguille du dynamomètre) du moment où l'on atteint le maximum de charge t (moment de séparation de l'aiguille indicatrice du dynamomètre et de l'aiguille témoin), a été chronométrée dans chaque cas et est notée dans les résultats.

Les pressions à la rupture sont rapportées à la section initiale du cube, c'est-à-dire 50 cm².

Après la rupture de chaque cube, on a mesuré sa hauteur et l'angle que formaient les fissures avec la verticale. On a également prélevé, au cœur de chaque cube essayé, un bloc d'environ 50 g pour la détermination de l'humidité pendant l'essai.

B. Généralités :

Pour éviter l'emploi de longues expressions en tête des colonnes des tableaux de résultats, nous indiquons ici, une fois pour toutes, la signification des symboles employés.

- θ = température de la salle d'essai
- P = poids du cube avant essai
- δ_a = poids spécifique apparent
- ϵ = humidité à cœur pendant l'essai, en % du poids sec
- C = compacité ou rapport du volume réel du sol à son volume apparent
- η = proportion d'eau en volume
- l = proportion d'air en volume
- R = pression maximum par cm² de section initiale
- h = hauteur du cube après essai
- t = durée de l'essai (définie précédemment)
- α = angle des fissures avec la verticale

Rappelons que, connaissant δ_a , ϵ et δ_r (poids spécifique absolu ou réel), on peut calculer les valeurs de C, η et l par les formules :

$$C = \frac{\delta_a}{\delta_r} \cdot \frac{100}{100 + \epsilon} \quad \eta = \frac{\delta_a}{\delta_{eau}} \cdot \frac{\epsilon}{100 + \epsilon}$$

$$\text{et } l = 1 - C - \eta$$

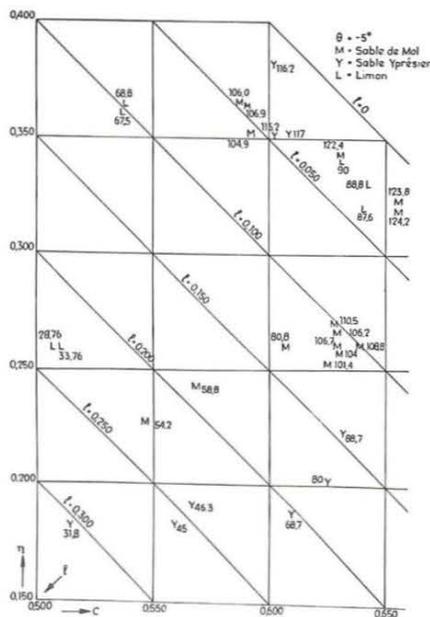


Fig 4. — Résistance des cubes de compositions diverses congelés à la température de -5°. Les coordonnées C (solides), η (eau) et l (vides) des points marqués M, Y, E, représentent la composition volumétrique des échantillons. La résistance est indiquée en kg/cm² à côté de chaque point.

C. Résultats.

Pour chaque température d'essai et chaque composition (sable, compacité et humidité) du matériau, trois cubes ont été soumis à l'essai. La moyenne des résultats obtenus est donnée au tableau II.

Pour mettre en évidence l'influence sur R des facteurs C, η et l, on a porté à la figure 4, les valeurs de R à la température de -5° en fonction de ces trois variables. Les diagrammes relatifs aux autres températures sont analogues.

Ces diagrammes sont en général assez irréguliers, mais on peut constater que les irrégularités correspondent très souvent à des valeurs anormales de C, η et l (composition volumétrique) ou encore à des durées anormales de l'essai (t). En particulier, la durée de l'essai, dont nous n'avons pas pu tenir compte, exerce certainement une influence non négligeable.

Bien qu'il ne faille pas attribuer une valeur trop absolue à ces diagrammes, étant donné la dispersion des résultats, il est cependant très intéressant de constater qu'on peut considérer la variation de R en fonction de l comme suivant une loi pratiquement linéaire. C'est donc l'influence du paramètre l, ou de la somme C + η = 1 - l, qui serait prépondérante.

Ces résultats nous ont permis de tracer, à la figure 5, le diagramme des variations de la pression maximum R en fonction de l et de la température pour le sable de Mol. Ce diagramme montre

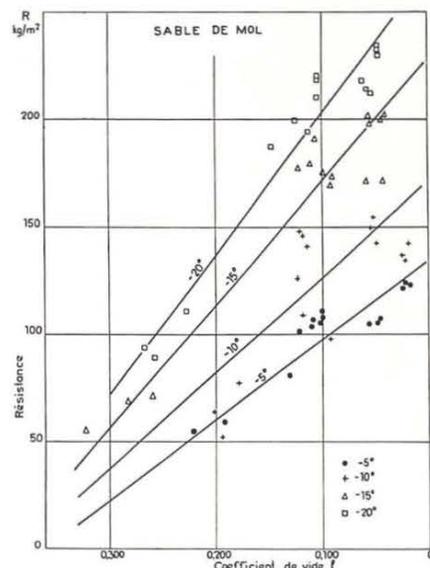


Fig 5. — Résistance, en fonction du coefficient de vides l et de la température θ , des cubes congelés en sable de Mol.

TABLEAU II

Humidité avant congélation	Poids des cubes	γ Poids spécifique apparent	ϵ Humidité pendant essai	Compacité	Proportion d'eau (en volume)	Proportion d'air (en volume)	Résistance à la température θ =				Hauteur du cube à la rupture	Durée de la compression	Angle des fissures avec la verticale
							-5°	-10°	-15°	-20°			
R (moyenne de 3 essais)							kg/cm ²				h	t	α
%							g/cm ³				mm	sec	°
Sable de Mol													
14,8	592	1.079	15,4	0,548	0,225	0,228	64,6	65,8	64,9	97,8	67,7	3,8-10,5	20°
14,8	685	1.955	15,6	0,651	0,260	0,109	108,5	111,0	172,1	195,5	67,2	6,5-20	20-45°
15,9	665	1.956	15,1	0,635	0,253	0,112	104,0	145,2	181,8	216,2	64,6	7 -21	30-44°
27,5	677	1.918	25,5	0,586	0,365	0,051	105,9	148,9	199,8	232,2	66,2	7,5-10	34-45°
25,0	699	1.979	21,5	0,615	0,346	0,037	125,5	158,5	181,6	215,0	67,9	6,5-20	25-30°
Sable Yprésien													
12,9	586	1.660	12,9	0,546	0,189	0,265	41,0	58,6	59,6	151,5	66,5	6,2-11	0-30°
12,9	670	1.897	12,0	0,625	0,217	0,159	79,1	97,8	117,8	158,6	65,8	7 -12	0-45°
25,0	685	1.958	23,1	0,585	0,365	0,052	116,4	117,6	150,5	188,8	67,5	7 -22	20-25°
Limon													
17,7	584	1.680	19,7	0,511	0,277	0,204	31,9	31,6	45,4	154,5	59,8	10 -18	10-45°
40	643	1.822	36,0	0,498	0,456	0,046	66,7	105,8	116,3	165,0	59,8	5 -15	0°
17,7	723	2.044	20,0	0,622	0,341	0,037	88,8	128,4	145,0	185,3	51,5	11,6-38	20-45°
Glace													
				0	1,000	0	7,5	7,0	0,6	13,3		2 -14	0°

que R croit de 80 à plus de 100 % lorsqu'on passe de la température -5°C à celle de -20°C.

Les diagrammes obtenus pour le sable de Mol sont confirmés par ceux obtenus pour le sable yprésien et le limon (fig. 6 et 7).

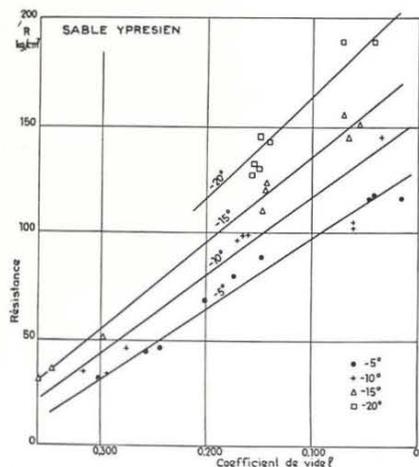


Fig. 6. — Résistance en fonction de l et de θ. Sable Yprésien.

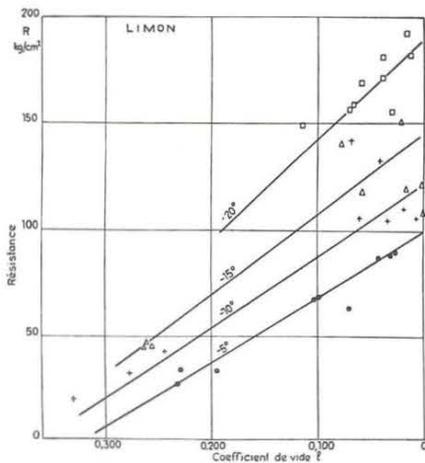


Fig. 7. — Résistance en fonction de l et de θ. Limon.

Les cubes de glace ont été soumis aux mêmes essais de compression que les cubes de sable et limon congelés.

Tous les cubes de glace se sont rompus de la même façon. A la rupture, apparaissaient sur les faces du cube des fissures verticales divisant celui-

ci en petits prismes verticaux d'environ 2 cm² de section.

Les résultats obtenus figurent sur le diagramme de la figure 8.

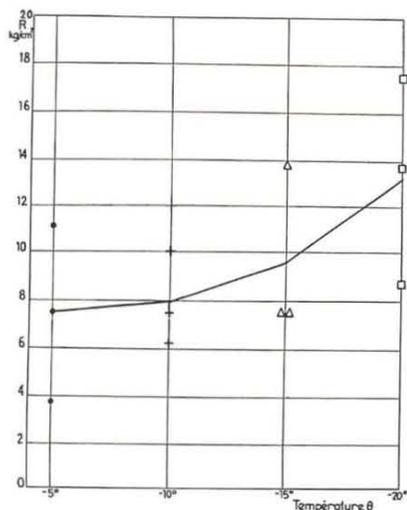


Fig. 8. — Résistance des cubes de glace en fonction de la température.

D. Formes de rupture des éprouvettes.

La rupture par fragmentation en petits prismes parallèles à la direction des pressions, qui est uniformément réalisée dans le cas de la glace pure, est bien connue et correspond à l'absence de frottement entre l'éprouvette et les plateaux de la presse. Elle se manifeste aussi fréquemment pour le sol le plus fin, le limon congelé et, avec une fréquence moindre et variable, pour les sables congelés. Ceux-ci se rompent souvent en double pyramide; ceci est l'indice d'un frottement important entre les éprouvettes et les plateaux de la presse. (9).

Il n'est d'autre part pas possible de déduire, par la relation $\varphi = \frac{\pi}{2} - 2\alpha$, l'angle de frottement

interne φ de l'angle α des faces de rupture avec la verticale. La dispersion des valeurs obtenues est trop grande; elle résulte de ce que l'angle α est en fait influencé surtout par l'importance du frottement sur les plateaux; il varie de 0 à 70°.

E. Conclusions.

Comme il était impossible de confectionner des cubes congelés ayant exactement la composition

(9) Consulter à ce sujet par exemple A. Mesnager — Matériaux de construction — Pierres, I. B. Bullière, Ed Paris 1925, pp. 75-87.

volumétrique (solide, eau, air) désirée, et comme d'autre part, on a constaté l'influence prépondérante du facteur l, nous nous sommes servi des diagrammes de R en fonction de l pour déterminer, dans le cas de chaque matériau et à chaque température, la valeur de R correspondant à une même valeur de l que nous avons choisie égale à 0.1. (fig. 9).

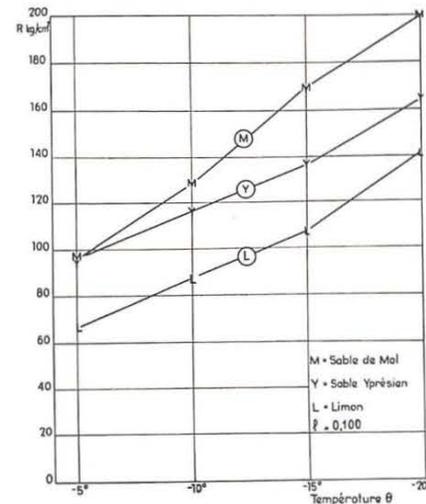


Fig. 9. — Résistance moyenne, en fonction de la température, des échantillons à 10 % de vides.

III. — Essais de compression lente.

Pour une température donnée (-5°, -10°, -20° C), et pour une mise en charge lente, on se propose :

- 1) de mesurer en fonction de la charge l'affaissement du cube comprimé;
- 2) de déterminer la pression limite supérieure au-dessus de laquelle il est impossible d'obtenir encore la stabilisation de l'affaissement.

A. Mode opératoire.

Les essais de compression lente sont réalisés avec les mêmes installations et appareils que les essais de compression rapide.

Les mises en charge s'effectuent le plus lentement possible et par paliers de 20 kg par cm² de section initiale, chaque surcharge restant maintenue jusqu'à stabilisation de l'affaissement. La nécessité de terminer l'essai sur un même cube en une journée a rendu nécessaire l'adoption d'une mise en charge variant de 20 en 20 kg/cm².

Les affaissements de chaque éprouvette sont relevés en fonction du temps, à l'aide d'un « fleximètre » enregistreur. Les indications de cet appareil sont contrôlées par deux fleximètres « ZIVY » gradués au 1/10 mm et fixés au plateau mobile de la presse. On mesure la section résistante du cube dès qu'une nouvelle surcharge de 20 kg/cm² est appliquée,

puis régulièrement au cours de la stabilisation. On en déduit la charge unitaire effective. La section résistante du cube est calculée d'après les dimensions des deux médianes rectangulaires mesurées chacune à 1/10 mm près. Elle est donc un peu supérieure à la section réelle qui prend une forme curviligne.

Après essai, on prélève au cœur de l'éprouvette un échantillon de 50 g environ pour la détermination de l'humidité exacte pendant l'essai.

Afin d'éviter tout effet de fretage dû aux plateaux de la presse, on les a enduits d'huile incongèlable.

B. Généralités.

Dans l'expression des résultats, nous utilisons les mêmes symboles que précédemment avec en plus :

- π = charge en kg par cm² de section initiale du cube
- π' = charge réelle en kg par cm² de section réelle
- Δ_h = affaissement en % de la hauteur initiale du cube
- t = temps exprimé en minutes et compté à partir du début de la mise en charge.

C. Résultats.

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau III. Pour chacun des matériaux étudiés, on a soumis à l'essai des cubes à compacité maximum et des cubes à humidité maximum. On a enfin réalisé des cubes en glace pure et on les a soumis au même essai.

Pour chaque cube, on a relevé le diagramme des déformations en fonction du temps et de la charge appliquée. La figure 10 donne un exemple de ces diagrammes (cas du sable Yprésien à compacité maximum). La durée de chaque essai a varié de 5 à 15 heures.

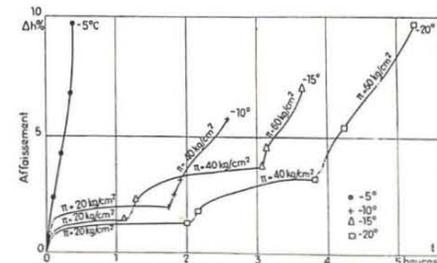


Fig. 10. — Affaissement en fonction du temps des cubes congelés (sable Yprésien). Mise en charge par paliers de 20 kg/cm².

Vu l'impossibilité de reproduire ici tous ces diagrammes, nous en avons condensé les indications sur les figures 11, 12, 13 et 14. L'ordonnée de chaque point y représente l'affaissement Δ_h relevé après stabilisation sous la charge réelle π' portée en abscisse.

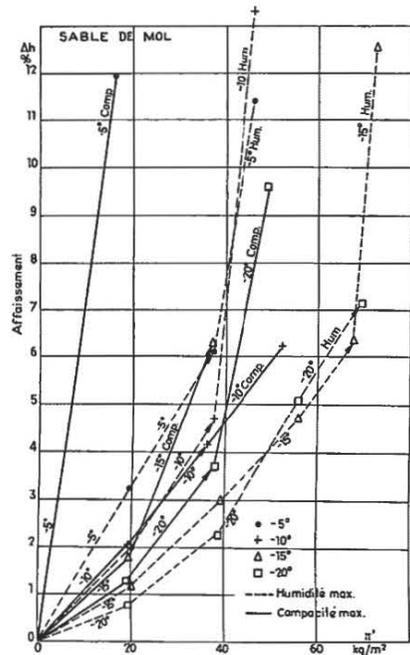


Fig. 11. — Affaissements finaux, pour chaque palier de charge, des cubes congelés en sable de Mol. Les têtes de flèches correspondent à la charge limite au delà de laquelle l'affaissement ne se stabilise plus.

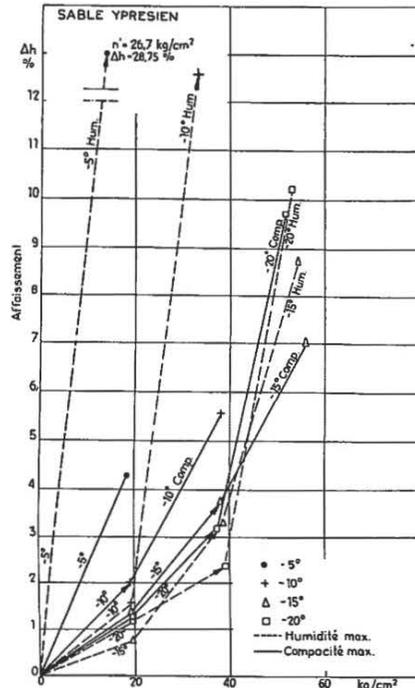


Fig. 12. — Affaissements finaux, Sable Yprésien.

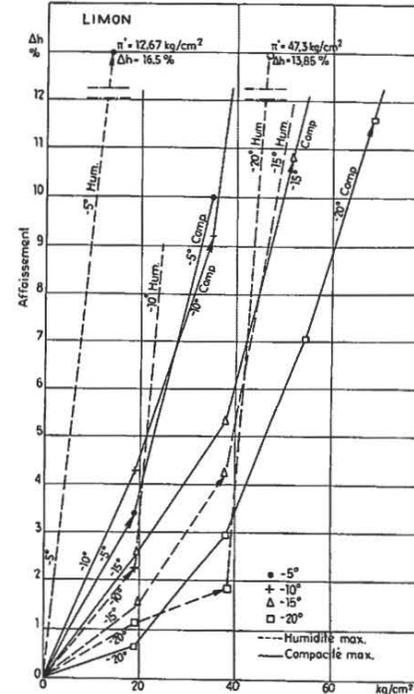


Fig. 13. — Affaissements finaux, Limon.

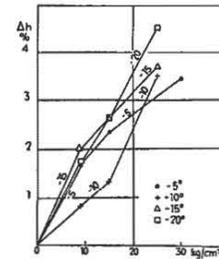


Fig. 14. — Affaissements finaux, Glace pure.

faible humidité et un affaissement important des cubes de forte humidité. Il semble aussi qu'aux très basses températures (-20°C) et pour une même charge, l'affaissement avant stabilisation diminue lorsque l'humidité augmente.

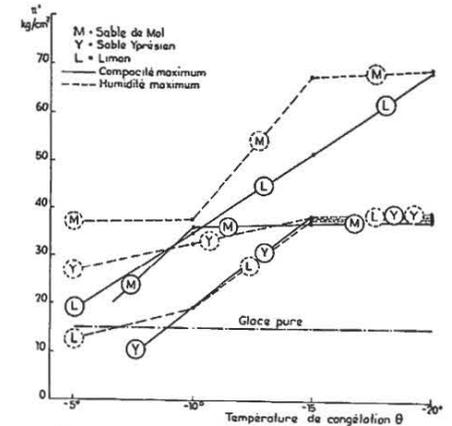


Fig. 15. — Charge limite en fonction de la température.

Nous avons également tracé à la figure 15 le diagramme des pressions limites en fonction de la température.

Malgré l'imprécision qui affecte la valeur de la pression limite (l'écart -20 kg/cm^2 entre les différentes charges appliquées est assez important et les valeurs calculées pour les sections résistantes sont supérieures à la section résistante réelle), on peut constater que, pour les sables, la pression limite augmente d'autant plus que la température diminue et que l'humidité augmente.

Il existe une variation brusque de la pression limite lorsqu'on passe de la zone des basses températures (-5° , -10°C) à la zone des très basses températures (-15° , -20°C). L'importance que peut prendre cette variation paraît révéler l'existence d'un seuil critique de température.

Pour le limon, inversement à ce qui se passe pour les sables, la pression limite qui donne encore une stabilisation est moins élevée pour les cubes à humidité maximum que pour les cubes à faible humidité.

Les cubes de glace ont été soumis aux mêmes essais de compression lente que les cubes de sables et limon congelés. Les résultats obtenus sont reportés sur la figure 14.

Il a été impossible de mesurer la section résistante, à cause de la fusion de la glace.

Remarque générale.

Il eut été souhaitable de pouvoir tracer le diagramme des affaissements finaux en fonction de la charge, pour chaque matériau et chaque température. Mais les conditions de l'expérience (nécessité d'une mise en charge variant de 20 en 20 kg/cm^2)

TABLEAU III

Humidité avant congélation	Poids des cubes	Poids spécifique apparent	Humidité pendant essai	Compacité	Proportion d'eau (en volume)	Proportion d'air (en volume)	Pression limite à la température $\theta =$				Affaissement sous la pression π																					
							-5°	-10°	-15°	-20°	-5°	-10°	-15°	-20°																		
%	g	g/cm^3	%	C	η	l	π kg/cm^2				Δ_{11} %																					
Sable de Mol																																
14,8	648	1,844	15,12	0,601	0,240	0,159	<20	36,0	36,0	37,3	15,30	4,18	6,23	3,71																		
25,0	702	1,985	19,86	0,625	0,320	0,046	37,1	37,4	67,3	69	3,07	4,71	6,30	7,15																		
Sable Yprésien																																
12,0	665	1,884	12,80	0,621	0,213	0,168	<20	19,3	38,3	38,6	0,71	2,0	3,72	3,22																		
25,0	603	1,900	22,27	0,596	0,357	0,047	26,7	32,7	38,5	39,2	28,75	12,6	3,28	2,36																		
Limon																																
17,7	726	2,053	18,20	0,633	0,317	0,050	18,7	35,1	51,7	68,8	3,44	9,21	10,8	11,66																		
40,0	651	1,785	34,94	0,482	0,462	0,056	12,67	18,0	37,8	38,4	16,5	2,28	4,21	1,88																		
Glace																																
					0	1,000	0	15	15	15	15	2,33	1,34	2,64	2,64																	

La tête de flèche sur chaque courbe correspond à la « charge limite ».

Malgré certaines différences affectant C, η , l , l'examen et la comparaison de ces diagrammes nous montrent que :

- 1) pour une même humidité et une même charge, l'affaissement avant stabilisation diminue lorsque la température diminue;
- 2) lorsque la température n'est pas très basse (-5°C), une faible surcharge unitaire (15 à 35 kg/cm^2) provoque la rupture des cubes de

et obligation d'attendre la fin de l'affaissement avant d'appliquer une nouvelle surcharge) ne nous ont pas permis d'obtenir un nombre suffisant de résultats.

* * *

Nous ne pouvons terminer cette note sans exprimer toute notre gratitude à Monsieur le Professeur Campus, Recteur de l'Université de Liège, et à son Chef des Travaux du Laboratoire du Génie Civil, Monsieur le Professeur Dantinne. Non seulement, Monsieur Campus a bien voulu mettre à notre dis-

position son laboratoire, ses instruments de mesure et son personnel, mais lui-même et son Chef des Travaux ne nous ont pas épargné les conseils que leur dictaient la science et la maîtrise qui ont fait leur renom d'expérimentateurs si distingués.

En concluant, nous tenons à présenter nos plus vifs remerciements au Fonds National de la Recherche Scientifique, et particulièrement à son Directeur, Monsieur Willems, et à son Secrétaire, Monsieur Fréson. C'est en effet grâce au subsidé que cette Institution a bien voulu mettre à notre disposition, que nous avons pu mener à bien cette étude.

La lutte contre les poussières

REUNION D'EXPERTS

tenuë à Genève du 1^{er} au 17 décembre 1952

(suite)

COMPTE RENDU par :

J. STASSEN,
Ingénieur
du Corps des Mines, à Liège.

A. HOUBERECHTS,
Professeur à l'Université de Louvain,
Directeur de l'Institut d'Hygiène des Mines (Hasselt),
Président de la Réunion.

E. DEMELENNE,
Ingénieur Principal
du Corps des Mines, à Mons

SAMENVATTING

In de aflevering van Maart 1955 van de Annalen der Mijnen hebben wij het punt 5 van de dagorde van de bijeenkomst van Genève uiteengezet. Deze dagorde vermeldde namelijk de volgende punten :

1. Voorkoming van de vorming van stof.
2. Afscheiding van het stof de plaats van zijn ontstaan.
3. Middelen om het neergeslagen stof te verhinderen in suspensie te komen in de lucht.
4. Afscheiding van het stof in suspensie in de lucht.
5. Monsternamen, meting en ontleding van het stof.
6. Uitrustingen voor individuele bescherming.
7. Nazicht en onderhoud van de dispositieven tot voorkoming en bestrijding van het stof.
8. Opleiding en beroepsvorming van het personeel.
9. Bizardere problemen.
10. Internationale samenwerking.

Het punt 5 beoogde de meting van de stofconcentraties te bepalen in de atmosfeer der werkplaatsen, meting die moet toelaten op objectieve wijze de werkplaatsen op te sporen waar de stofgehalten overdreven zijn.

Wij hernemen nu het onderzoek van de negen overige punten van de dagorde met een overzicht van de middelen om het stof te verminderen in de werkplaatsen waar het stofgehalte te hoog is.

Volgens het oordeel der deskundigen kan men slechts werkelijk bevestigende uitslagen bekomen door het gebruik van gecombineerde middelen. Te vaak heeft men gemeend het stof te kunnen doen verdwijnen door een enkel middel. Men gebruikte ofwel injecties in de laag, ofwel sproeiers, ofwel pikhamers met waterverstuiving enz., maar zelden werden verschillende dezer middelen samen toegepast.

Indien er veel stof overbleef na injectie in de laag, werd de methode veroordeeld, niettegenstaande dat ze waarschijnlijk haar doel, het onschadelijk maken van het stof bevat in de kliefolakken, volledig bereikt had, zonder te overwegen dat er andere oorzaken van stofvorming, zoals de winning, het schuppen, de overladingen, het vervoer, bleven bestaan waartegen niets werd ondernomen.

Men moet er zich van bewust zijn dat, om het stof afdoende te weren, het nodig is tegelijkertijd al de oorzaken van het ontstaan, van de verspreiding en van het opwekken van stof te neutraliseren en dat men bijgevolg gelijktijdig de middelen moet aanwenden die geschikt zijn om ieder dezer oorzaken afzonderlijk te bestrijden.

Dit dient het grondprincipe te zijn van iedere doeltreffende stofbestrijding.