

Nouveautés dans le fonçage des puits par congélation

par S. L. SIK, Dipl. Ing. à Vienne.

Traduit de « Glückauf » du 9 juin 1951 par L. DENOEL,
Professeur à l'Université de Liège.

SAMENVATTING.

De auteur geeft een overzicht van de verschillende procédé's van schachtdelving en geeft de reden van de keuze van de bevroes-methode voor de delving van twee schachten van 330 en 350 m diepte, bestemd om een lignietafzetting te ontsluiten die gelegen is onder een dekterrein van mergel, schiefer en waterhoudende zanden op de volgende diepten :

- 20 m zanden tussen 0 en 80 m
- 40 m zanden tussen 80 en 180 m
- 65 m zanden tussen 180 en 290 m.

De pasgewijze bevroezing van het terrein liet toe de vorming van de ijsmuur binnen ruime grenzen te regelen en tevens een niet bevroren centrale kern te behouden.

Verdere nieuwigheden en voordelen kunnen als volgt samengevat worden :

- 1) vermindering van de bevroeskosten. Geen vrees voor lekken aan de bevroesbuizen;
- 2) behoud van de verticaliteit der boringen door toepassing van een methode van snelslagboring met grote valhoogte;
- 3) Concentratie van de koude op een willekeurig gekozen punt, hetgeen de dienstonderbrekingen vermijdt;
- 4) toepassing van een anti-vriesbeton, verwerkbaar tot -8° , door gebruik van een speciaal cement met geringe, maar langdurige warmteontwikkeling bij de binding;
- 5) gebruik van voorafgaandelijk verwarmde materialen bij de uitvoering van metselwerk onder bevroezing;
- 6) gebruik van een continue dichtheidsvoeg over gans de omtrek van de schacht;
- 7) bijzondere voorzorgen opdat de isolerende stof waterdicht zou blijven, welke ook de temperatuur zij die in de schacht heerst tijdens het solidificatie-proces;
- 8) verbinding van de verschillende delen van de schachtbekleding door middel van metalen ankers.

RESUME.

L'auteur passe en revue les différents procédés de creusement des puits et donne les raisons du choix du procédé par congélation. Il s'agit du creusement de deux puits de 330 et 350 m de profondeur pour atteindre un gisement de lignite recouvert par des marnes, des schistes et des sables aquifères, situés à plusieurs niveaux :

- 20 mètres de sable entre 0 et 80 m
- 40 mètres de sable entre 80 et 180 m
- 65 mètres de sable entre 180 et 290 m.

La congélation du terrain par passes permet de régler entre de larges limites la formation du mur de glace et la conservation d'un noyau central non congelé.

Les autres nouveautés et avantages sont les suivants :

- 1) réduction des frais de congélation. Pas de risques de fuite aux tubes congélateurs;
- 2) maintien de la verticalité des sondages par battage très rapide à grande hauteur de chute;
- 3) concentration du froid à volonté en un point quelconque, ce qui écarte les interruptions du service;
- 4) confection d'un béton antigel jusqu'à -8° C par l'emploi d'un ciment spécial dont la prise dégage une chaleur faible, mais de longue durée;

- 5) la maçonnerie est garantie contre la gelée par l'emploi, pour la première fois, de matériaux préalablement chauffés;
- 6) application d'un joint d'étanchéité continu sur tout le périmètre du puits;
- 7) précautions spéciales pour que la matière isolante reste imperméable, quelle que soit la température régnant dans le puits lors de la solidification;
- 8) liaison des diverses parties du revêtement du puits par des ancrages métalliques.

Dans le fonçage de deux puits par le procédé de la congélation, on a rencontré de grandes difficultés qui ont été surmontées avec succès. On a dû recourir à certains procédés particuliers qu'il est utile de faire connaître.

Le problème consistait à creuser deux puits de 330 et 350 m de profondeur pour atteindre un gisement de lignite recouvert par des marnes, des schistes et des sables aquifères à plusieurs niveaux. Le contrat d'entreprise stipulait un prix maximum.

Conditions du terrain et procédé de fonçage.

Aperçu géologique.

Le terrain à traverser appartient au tertiaire supérieur, étage Miocène, composé de sédiments lacustres et de deltas. Il se compose en général de bancs de marnes solides avec des intercalations de terrains bouillants qui sont constitués par des sables très fins et argileux. Toutes les couches de marne ne sont pas imperméables. Les veines de charbon sont comprises entre des marnes et des schistes souvent mêlés de petits filets de sables aquifères. On prévoyait l'installation d'envoyages à 3 niveaux et il fallait assurer une liaison étanche des salles d'accrochages avec les puits.

La tâche était rendue particulièrement difficile par l'épaisseur considérable des couches de sables bouillants qui se présentaient séparément aux diverses profondeurs. Dans la région supérieure, sur 80 m de terrains, il y avait une couche de sables de 20 m d'épaisseur. Dans la passe suivante, entre 80 m et 180, on trouve 40 m de sables et, entre 180 m et 290 m, des couches de 65 m d'épaisseur totale rendant le travail très difficile; de minces couches d'argile y étaient localement intercalées. Partout, le terrain bouillant était constitué d'éléments très fins : 45 % des grains étaient compris entre 0,3 et 0,06 mm et le reste entre 0,06 et 0,02 mm, et parfois encore plus fin. C'est donc un terrain qu'il est impossible de drainer. Entre ces différents niveaux aquifères, il y avait des bancs de marne assez épais pouvant être regardés comme des assises étanches.

La teneur en eau des sables bouillants variait entre 15 et 24 % et la venue d'eau dans les sables grossiers s'élevait respectivement à 240 l/min dans la passe supérieure, 350 l/min dans la passe moyenne et 850 l/min dans la partie la plus profonde. Ces grandes quantités d'eau ont pu se démontrer lors de la congélation.

Choix du procédé de fonçage.

Dans des conditions aussi difficiles, il n'était pas commode de dire a priori quel serait le procédé le mieux approprié et le moins coûteux et il a fallu recourir à des investigations sérieuses. Le procédé Honigmann ne paraissait pas très sûr à cause de la nécessité de creuser trois chambres d'envoyage à double entrée et de la difficulté de forer des bancs de marne dure de 30 à 60 m d'épaisseur. La cimentation est inapplicable dans les sables fins. Le procédé Joosten devait également être écarté à cause de l'extrême finesse des sables. On fit une étude détaillée du procédé par trousse coupante avec 3 ou 4 tours télescopiques. Ces tours devaient avoir des hauteurs de 20, 40 et 60 m et être constituées de cuvelages en acier, dont le prix très élevé — sans compter les risques d'une passe de 60 m — a fait écarter le procédé. On a envisagé aussi le creusement à niveau vide, mais après des recherches de laboratoires qui ont démontré l'impossibilité de drainer les sables, le procédé est apparu inapplicable. Le procédé par petites passes avec troupes de retenue partielle des eaux a été aussi étudié, mais on ne l'a pas retenu, en considération des grandes difficultés d'exécution dans les terrains meubles et de l'impossibilité de faire un devis, même approximatif, des dépenses.

Après réflexion, il ne restait donc plus que le procédé coûteux de la congélation. On élaborait un projet de congélation par passes successives, d'après lequel la partie supérieure devait être congelée et creusée à partir de la surface jusqu'à 65 m. Ensuite, partant du fond du puits, on aurait creusé une chambre annulaire pour y établir le cercle des sondages et la couronne de congélation jusqu'à 185 m, et enfin une troisième passe par la même méthode entre 220 et 290 m. Ainsi, chaque niveau aquifère aurait été congelé séparément. Cependant, on a reconnu que l'économie à réaliser de cette façon ne pouvait être estimée avec vraisemblance et serait en tout cas assez faible. Finalement, il a été décidé de faire la congélation en une seule passe sur toute la hauteur à partir de la surface.

Le prix élevé des cuvelages métalliques et la difficulté de livraison ont fait donner la préférence à un revêtement en maçonnerie étanche. On s'est inspiré des précédents réalisés notamment dans la Haute Silésie, bien qu'à des profondeurs moindres. Ces procédés ont été développés et améliorés et, comme on va le voir, couronnés de succès. Les deux puits sont maintenant en service depuis plusieurs années sans dérangement.

Marche des travaux.

Les puits devaient avoir 5 m et 4 m de diamètre et une profondeur de 325 m. Le terrain a été congelé jusqu'à 290 m à l'un et 300 m à l'autre. Les cercles des sondages avaient respectivement 10 m et 8,5; les tubes étaient distants de 1,12 m et il fallait donc théoriquement 28 sondages d'une longueur totale de 8500 m au grand puits et 24 sondages d'une longueur totale de 7500 m au petit, en tout 16.000 m à forer. Au cours du forage, on a fait des mesures de pression et de débit de chacune des nappes aquifères pour déterminer en conséquence l'épaisseur du mur de glace. Ces travaux ont débuté il y a 10 ans et duré 4 ans. Le diamètre du terrain congelé supposé circulaire, calculé en fonction de la conductibilité et de la chaleur spécifique des roches ainsi que de la quantité d'eau, allait de 13 à 18 m à l'un des puits et de 10 à 14 m à l'autre, ce qui correspond respectivement à des volumes congelés de 53.000 et 33.000 m³.

La quantité de frigories nécessaires, en admettant une température initiale des roches de + 12,5° C et une température du mur de glace comprise entre -10 et -14° C, était de 4300 millions Kcal au premier puits, de 2500 millions au second. Dans ces quantités, on comprend les frigories nécessaires pour congeler le terrain et ensuite pour maintenir le mur de glace pendant toute la durée du fonçage et du revêtement. Des pertes considérables ont été dues aux causes courantes : cette circonstance n'était pas connue lors de l'adjudication, mais elle s'est révélée lors du dégel.

Données importantes et constatations au sujet de la congélation.

Forage et tubage.

Pour accélérer le travail, on a mis simultanément en œuvre trois sondeuses à percussion rapide, prévues pour 400 m de profondeur. Une seule tour de sondage servait à toutes les opérations. A chaque puits, les treuils de sondage une fois installés, on pouvait atteindre tous les trous par un simple déplacement de poulies de renvoi, installées sur le plancher de manœuvre à 22 m de hauteur. Les tiges étaient du type rigide avec suspension à ressort. Etant donné la présence de sables bouillants, on a fait le curage à l'eau lourde, densité 1,26, obtenue par un délayage de kaolin; les boues de curage avaient une densité de 1,30. Les tubes de soutènement avaient 385 à 430 mm de diamètre au début et 150 ou 180 mm à la fin. On n'a jamais laissé plus de 10 à 15 m à nu et on a employé 5 ou 6 cours de tubes jusqu'à la profondeur de 300 m. La perte en tubes n'a été que de 15 %, bien que certains tubes soient restés sous la pression des sables bouillants pendant 4 mois.

La vitesse de forage moyenne des 3 sondeuses a été d'environ 900 m par mois; l'avancement journalier moyen par machine a été de 11 à 13 m. Tout le travail de sondage, descente des tubes congelateurs, reprise des tubes de sondage (avec emploi de presses hydrauliques pouvant déployer 600 atm), a demandé 13 mois au grand puits et 11 mois au petit. Dans ces temps sont comprises les mesures de verticalité qui ont été faites au moins deux fois à chaque sondage.

Il y a lieu de mentionner ici que toutes les déviations sont restées dans des limites tolérables, grâce à un procédé particulier employé pour la première fois et qui sera décrit plus loin. La garantie donnée pour les sondages était une déviation maximum de la verticale de 0,80 m, ce qui revient à dire que nulle part la distance entre deux tubes congelateurs voisins ne devait atteindre 2 m.

Au premier puits, où l'on n'avait pas encore toute l'expérience, deux sondages ont donné un écart de 8 m au pied, 3 autres 1,50 m et 3 m, mais pour les 22 restant, la déviation est restée entre 15 et 50 cm. Dans 12 sondages, la déviation n'a pas dépassé 30 cm, ce qui correspond à un angle de 10". Dans les sondages forés pour d'autres buts que la congélation, la tolérance est de 1° ou 1,5° pour des profondeurs de 300 à 500 m. Dans notre cas, en attribuant à chaque sondage un cylindre de glace de 2 m de diamètre, on a trouvé un mur de glace fermé. Le dernier mesurage a été fait à la profondeur de 270 m et, malgré la forte déviation de deux sondages (fig. 2), en admettant un diamètre d'action de 2,50 m, le mur de glace est entièrement fermé. Ce résultat particulièrement favorable entraîne une réduction notable des frais de sondage. Il est dû au renforcement de la batterie de ressorts de la tête de battage (8 pièces au lieu de 2, ressorts de voitures ordinaires), et ensuite à une grande hauteur

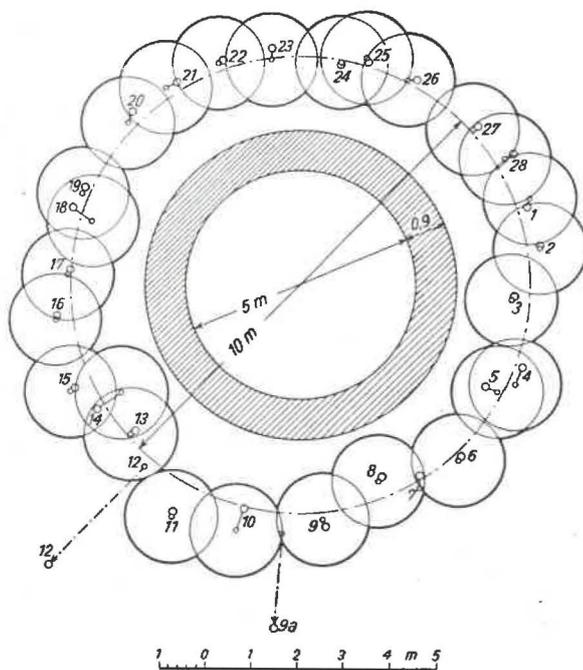


Fig. 1. — Ceinture des tubes congelateurs à la profondeur de 100 mètres.

Les cercles gelés ont été tracés avec 2 m de diamètre.

Les tout petits cercles indiquent les centres des tubes à la surface du sol;

les cercles un peu plus grands, les centres des tubes à — 100 m.

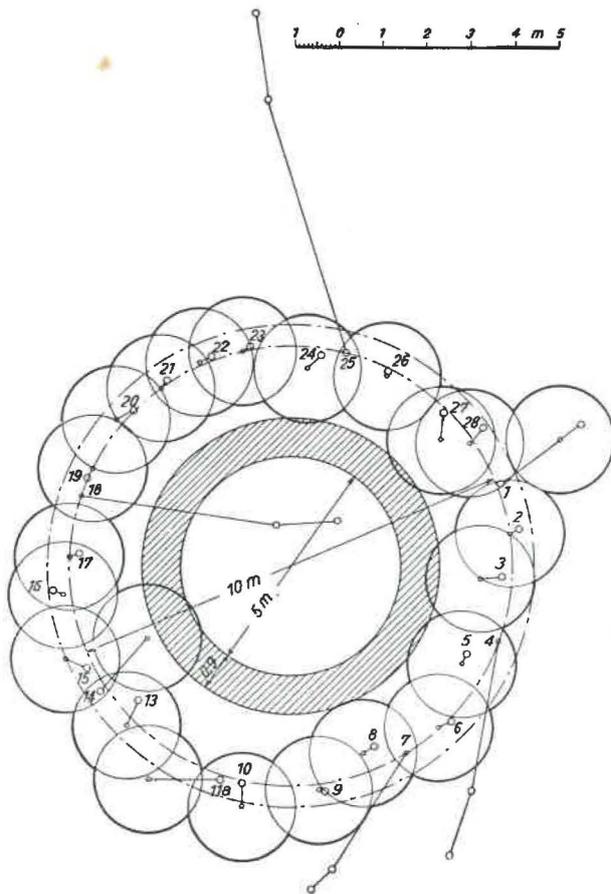


Fig. 2. — Ceinture des tubes congélateurs à — 250 m.
Diamètre du cercle gelé : 2,5 m.
Les deux petits cercles réunis par un trait indiquent la déviation de chaque tube.

de chute, de sorte que le choc du trépan étant très dur mais de très courte durée, les tiges sont toujours bien tendues et n'ont pas tendance à dévier. Pour la même raison, le trépan n'est plus sollicité à glisser suivant la pente des strates quand il recoupe des roches de dureté différente.

Pendant le travail, on a foré 57 trous d'une longueur totale de 16400 m. Pour le tubage, on a employé 46000 m de tubes; on disposait de 8600 m en cinq calibres différents. Chacun a servi environ 5 fois et la perte totale s'est élevée à environ 4000 m de tubes.

Marche de la congélation.

Sur la base des frigories estimées, on a installé deux compresseurs d'acide carbonique d'une capacité de 200.000 F/h. C'étaient deux machines d'un type ancien : WM de Halle. Ils se composaient de deux unités de compresseurs à 70 kg/cm², détendeurs, refroidisseurs, pompes de circulation d'eau et de saumure, le tout nécessitant une puissance de 380 CV. Comme agent refroidissant, on a choisi l'anhydride carbonique dont la détente de 68 à 15 atm fait tomber la température de +15° C à —38°.

Pour refroidir le terrain, on a fait circuler une solution de chlorure de calcium à 27° Be ayant un point de congélation de —37° C. En général, la saumure circulant avait au début une température de —20° à —26° C à l'entrée et de 8° en plus à la sortie du circuit. Après la formation du mur de glace, le réchauffement de la saumure a été limité à 2 ou 3°. La dépense journalière en CO² a été au début de 50 kg, les deux unités étant en service jusqu'à la fermeture du mur de glace, ensuite elle a été réduite

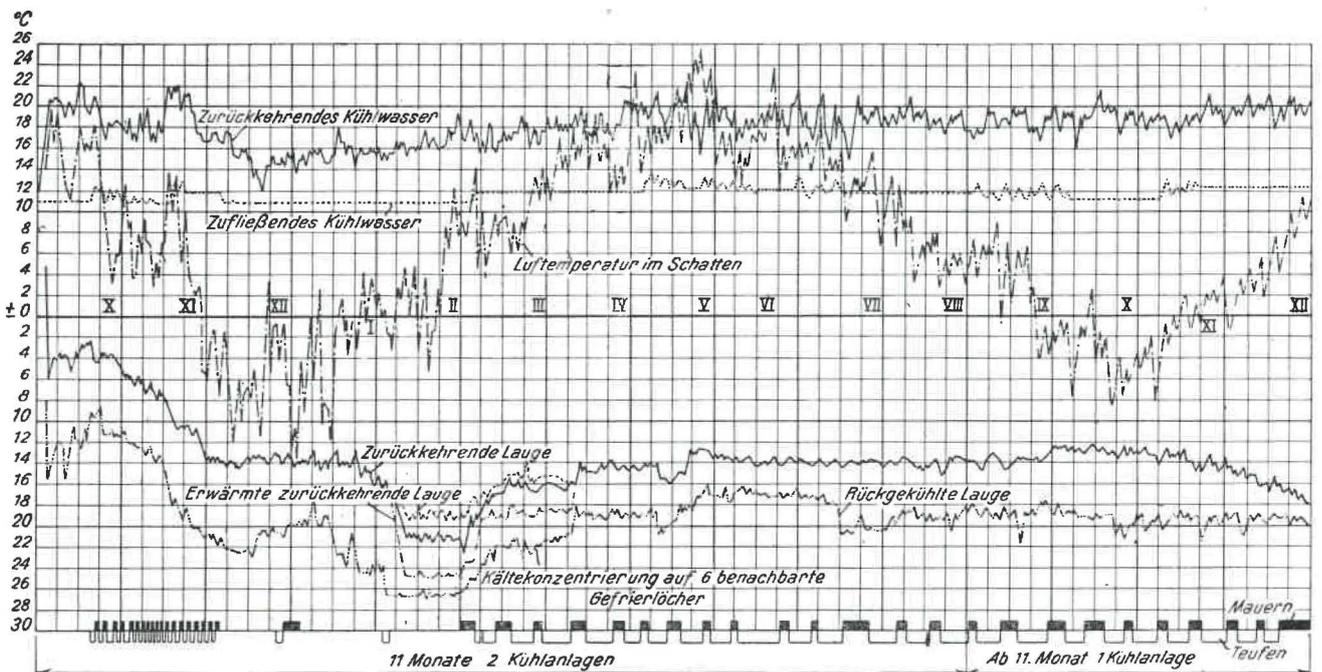


Fig. 5. — Diagrammes des températures de la saumure froide à l'entrée et à la sortie, de l'eau de refroidissement et de l'air.
Période de creusement et de muraillement jusqu'à 240 m de profondeur.

à 30 kg. Pour maintenir l'équilibre, il a suffi dans la suite d'une seule unité en marche avec une dépense journalière de 12 kg. Ces résultats, déjà très satisfaisants, ont encore été améliorés quand on est passé au second puits.

La figure 3 donne les variations des températures en divers points des circuits pour une période de 5 trimestres.

Des incidents imprévus ont fait qu'au deuxième puits, entre deux tubes distants de 2,20 m, il y eut une lacune dans le mur de glace.

Après maints essais répétés, on a employé, sans doute pour la première fois, le *procédé de la concentration du froid à une place déterminée du puits*. Ceci a été réalisé en forçant la saumure froide vers l'endroit critique par étranglement ou mise hors circuit des conduits situés dans la partie bien congelée, par abaissement de la température de la saumure injectée, accroissement de l'apport de CO₂, détente plus prolongée et enfin par une réduction appréciable de la longueur du circuit des parties menacées. On a accéléré la descente de la saumure froide par une pression d'air en même temps qu'on ouvrait une canalisation spéciale pour le retour direct de cette saumure. Ces moyens ont réussi dans chaque cas à recongeler en un temps court, 24 heures au plus, les fissures qui, pour n'importe quelle cause, ont pu se produire dans le mur de glace. L'important, c'est qu'instruits par cette expérience au puits n° 1, on a pu dès l'abord, au puits n° 2, appliquer une sorte de congélation par passes, en congelant graduellement le terrain par paliers, cependant avec des transitions peu sensibles, au fur et à mesure de l'approfondissement. De cette façon, on a pu laisser au centre un noyau de terrain non congelé.

L'avantage, c'est que :

- 1) le creusement est plus rapide et moins coûteux, par suite de la suppression des mines de déchaussement;
- 2) on économise aussi du temps et de l'énergie pour la congélation.

La réalisation a été très facile. Les tubes congélateurs étant placés jusqu'au fond, les tubes adducteurs avaient 55 à 85 m, la longueur variant de chaque tube au suivant; ensuite 3 mois avant que le fonçage n'atteigne le niveau de 40 m, les tubes ont été enfoncés de 30 à 50 m, et ainsi de suite, jusqu'à la profondeur de 290 m. On n'a éprouvé aucune difficulté.

Le fonçage a pu commencer pour ainsi dire tout de suite et sans attendre plusieurs mois comme d'habitude. *Les frais de congélation ont été réduits de 40 %*. On avait saisi la mesure de l'avancement de la congélation dans les diverses sortes de roche et on a pu garder le noyau central non congelé sur toute la profondeur.

Comme tubes congélateurs, on a employé des tubes de 133 et de 153 mm de diamètre, en acier spécial, avec joints par manchons intérieurs cylindriques. Tous les tubes ont été essayés lors du placement sous une pression d'eau de 55 atm et pen-

dant une durée de 90 minutes. Après l'achèvement de la congélation et solidification du revêtement du puits, les tubes congélateurs, suivant une pratique connue, ont été vidés, puis perforés à diverses hauteurs et injectés, sous forte pression, d'un béton sable-ciment. Les 50 m de tubes sous la surface ont été repris, les autres sont restés dans le terrain (en tout 12500 m), cette ceinture de tubes bétonnés devant constituer un renfort du revêtement des puits, spécialement dans les passes de sables bouillants.

Malgré les précautions prises pour assurer l'étanchéité des joints, il est arrivé au puits n° 2, avec des tubes ayant déjà servi dans plusieurs fonçages, que la contraction résultant d'une différence de température qui a atteint 40° C, a causé des déformations des filets de vis des manchons et des fuites de saumure. En pareils cas, on épuise la saumure dans le tube endommagé, puis on descend dans celui-ci un autre tube de 89 mm de diamètre et on le relie au circuit.

Les fuites peuvent s'expliquer par le fait que la tête et le pied des tubes sont déjà fortement encastés dans le terrain congelé, tandis que la congélation est plus tardive dans les passes de sable bouillants et que la contraction peut ainsi y provoquer de très fortes tensions. Dans un des cas où une petite venue de saumure s'est produite (alors qu'on était en train de traverser une couche de sable bouillant), on a observé une température de -6° à -8° C dans cette couche et une température de -14° C dans les marnes du toit. On a pu, d'autre part, s'assurer que l'épaisseur totale du mur de glace à l'endroit endommagé était de 3 m. Il était très important pour la direction de l'entreprise de vérifier la cause alors inconnue de cet accident. On fit une rainure partant du fond du puits vers le tube suspect, et l'on constata que le sable congelé avait une température de -4° à la paroi allant jusqu'à -8° C au contact du tube, et que ce sable était dur et très difficile à creuser à l'aiguille du marteau pneumatique; il avait la consistance d'un grès à grain fin. Arrivé au premier joint, on s'aperçut que les extrémités des deux tubes étaient écartées de 8 mm par l'effet de la contraction. Ce petit jeu dans le filetage suffisait pour permettre une fuite de quelques mètres cubes de liquide vers l'intérieur du puits. A l'extérieur se trouvait un anneau de 30 mm d'épaisseur, plein d'une boue de saumure et par conséquent dégelé. Pour éviter des incidents de l'espèce, la congélation graduelle est recommandable. Au puits n° 2, on n'a observé aucune fuite de saumure par les joints.

La verticalité des sondages a été vérifiée constamment par l'*appareil nautique enregistreur*, aux profondeurs comprises entre 100 et 270 m. Avant la descente des tubes congélateurs, une vérification a été faite sur toute la profondeur. L'instrument est connu, ainsi que son application. Dans le cas actuel, on a pu se rendre compte de sa précision.

A chacun des deux puits, on a rencontré un tube dans la section du creusement. En repérant leur

situation exactement et en la comparant aux données de l'instrument nautique, on a constaté un écart de 10 % entre les deux mesures de la déviation.

Fonçage.

Le travail de fonçage ne présente pas de particularités. Le service de l'extraction s'est fait dans la tour de sondage en bois, de 14×14 m de superficie et de 26 m de hauteur. Treuil à deux tambours, 2 cuffats de 800 l, vitesse de 4 m/s.

Comme le centre du puits n'était pas congelé, l'abatage a été très simplifié. Ce n'est que dans les marnes très dures qu'il a fallu faire des tirs de déchaussement. La partie non congelée avait un diamètre de 1,50 m à 2,50 m, le diamètre au creusement étant de 7 m. L'abatage s'est fait en grande partie aux marteaux-piqueurs de 9, 14 ou 32 kg. Dans les sables congelés, les trous de mine ont été répartis suivant 3 cercles successifs, en prenant bien soin que les fourneaux de paroi restent à 2,50 m au moins du tube congélateur le plus proche.

Dans la marne, l'effet utile a atteint $2,2 \text{ m}^2$ par homme/poste avec une moyenne de $1,45 \text{ m}^3$ au maximum et $0,85 \text{ m}^3$ de moyenne. Dans les marnes, les marteaux les plus lourds détachaient des morceaux de la grosseur du poing; dans les sables, de minces écailles. En moyenne, la résistance à l'écrasement du sable bouillant congelé était de 100 kg/cm^2 à -10° C et de 160 kg/cm^2 à -15° C , tandis que la marne, aux mêmes températures, avait une résistance de 60 à 100 kg/cm^2 . Les schistes et le charbon à l'état congelé étaient extrêmement fragiles.

On a noté quelques observations particulières. La marne est déjà congelée à partir de -1° ou -2° C , tandis que les sables aquifères ne commencent à se solidifier qu'à -5° C . Une autre singularité, c'est qu'on a trouvé à plusieurs reprises des filets d'eau congelés, qui se distinguaient nettement du terrain, en bandes de 3 à 7 cm faciles à photographier. Il y avait donc des courants d'eau dans le terrain. Cela s'est manifesté très clairement un peu au-dessus de la dernière couche imperméable; on a rencontré un véritable courant traversant la section du puits et donnant une venue de 500 l/min. Ce courant avait une forme en chenal et on pouvait le suivre sur une longueur de quelques mètres.

La hauteur des passes de creusement suivies du muraillement a varié entre 15 et 22 m; l'avancement moyen a été de 42 m par mois. Les avaleurs étaient protégés contre le froid par un gilet sans manches en peau de mouton, de hauts bas de laine et des sabots hollandais. Pendant le creusement, à des températures de -4° à -8° C , il y avait une ou deux distributions de café chaud additionné de rhum. Pendant l'exécution de la maçonnerie, les hommes portaient des gants chauds.

Muraillement du puits congelé.

Confection de la maçonnerie.

Le revêtement du puits a été fait entièrement en maçonnerie, avec renforcements dans les passes de

sables aquifères par une couronne de béton et liaisons étanches. L'épaisseur de ce revêtement a varié avec la profondeur, la pression hydrostatique et la consistance du terrain, entre 90 cm et 130 cm au grand puits et de 80 cm à 110 cm au petit. La maçonnerie se compose d'un anneau intérieur en briques bien cuites ayant une résistance de 500 kg/cm^2 et ne pouvant absorber que 3 % d'eau maximum. Le second anneau est en briques ordinaires et derrière lui vient un joint de 25 mm en matière isolante, puis un anneau de $\frac{1}{2}$ et de $\frac{3}{4}$ de briques alternant et donnant une forte indentation vers le terrain, puis un remplissage de béton d'une épaisseur de 25 à 65 cm au grand puits et de 15 à 45 cm au petit puits. Le mortier de la maçonnerie comprenait 300 kg de ciment Portland et un agent imperméabilisant; le béton de remplissage comprenait 400 kg de ciment spécial ainsi que le même agent.

Des précautions spéciales ont dû être prises pour réaliser cette maçonnerie insensible au froid. Des expériences malheureuses faites antérieurement ont montré le danger d'une destruction par la gelée avant la consolidation de la maçonnerie. Des recherches approfondies faites au Laboratoire d'Essais des Matériaux de Berlin par le professeur Grün sur des ciments spéciaux, ensuite des essais pratiques en grand ont démontré qu'il est possible d'exécuter un revêtement en béton dans un puits congelé à des températures de -8° à -12° C , sans danger de fondre le mur de glace et en assurant au béton une résistance d'environ 350 kg.

Comme la maçonnerie de briques peut aussi être endommagée, on a résolu la question par un procédé inédit consistant en un chauffage préalable des matériaux et l'emploi d'un ciment métallurgique à prise rapide accompagnée d'un dégagement de chaleur faible mais persistant. Les matériaux de construction : gravier, sable, mortier, briques, ont été chauffés dans des silos ou des étuves par des serpentins à vapeur, spécialement en hiver, à des températures de $+25^\circ \text{ C}$, l'eau de gâchage à $+35^\circ \text{ C}$. Les diagrammes 5 et 6 indiquent les variations de températures observées pendant le premier jour et une période de 28 jours. Les mesures ont été faites dans divers secteurs, en des points distants de 10 à 15 m dans la maçonnerie et dans le terrain. On a constaté que la chaleur de réaction du béton à 400 kg de ciment monte continuellement pendant 48 heures. Mais ce dégagement de chaleur n'a été que le tiers de celui qui est occasionné par un béton ordinaire et il est lentement progressif. Le diagramme n° 6 montre aussi que la température du béton en contact avec le terrain ne revient à 0° C qu'après 13 jours; le 28^e jour, elle est de $-1,5$ bien que le terrain contigu soit à -8° ou -6° . Des observations analogues ont été faites à l'intérieur du revêtement, de sorte que l'on peut conclure que le durcissement a pu se faire sans être contrarié par le froid et que la maçonnerie a pu acquérir sa résistance dans toute son épaisseur.

Un autre perfectionnement important consiste dans l'adaptation parfaite du joint isolant à la température du béton pendant la prise. On a constaté par des essais dans des conditions analogues à celles des puits qu'une certaine matière chauffée à 200° C lors de sa mise en œuvre pouvait être refroidie à + 15° C sans présenter de fissures, mais que des fissures capillaires se formaient à +12° C. Dans ce cas, le joint laissait suinter l'eau sous une pression de 5 atm, tandis qu'en l'absence de fissures, il restait étanche sous une pression de 25 atm. On a déterminé les températures de l'air ventilant le puits pendant le dégel, ainsi que la température définitive de la maçonnerie à diverses profondeurs, et on a pu choisir une masse isolante ne donnant lieu à aucune fissure capillaire à sa température de solidification.

Une autre amélioration importante, c'est que cette matière a été introduite dans le joint sans aucune interruption, même dans les assises de fondation, et qu'on a pu ainsi réaliser une étanchéité absolument continue.

La description qui précède montre que nous avons en réalité dans le soutènement deux corps cylindriques emboîtés. Il a fallu les rendre solidaires par une armature métallique en fers plats en forme de Z, dont le nombre a été déterminé par le calcul (fig. 4). Ces fers de liaison ont des dimensions telles qu'ils peuvent reporter tout le poids de la tour en briques sur la ceinture de béton. Dans les assises, on a introduit en plus quelques fers profilés.

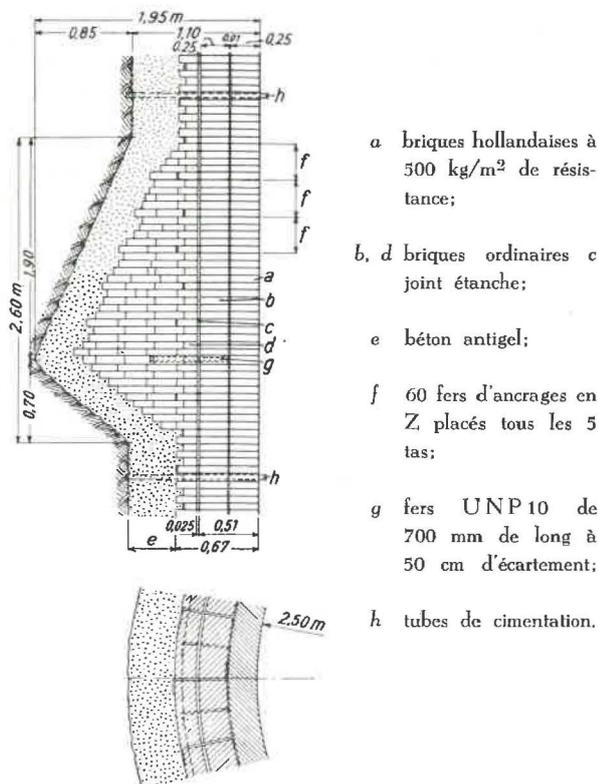


Fig. 4. — Maçonnerie antigel du puits avec joint d'étanchéité et fers d'ancrage en Z reliant le béton à la tour intérieure en briques.

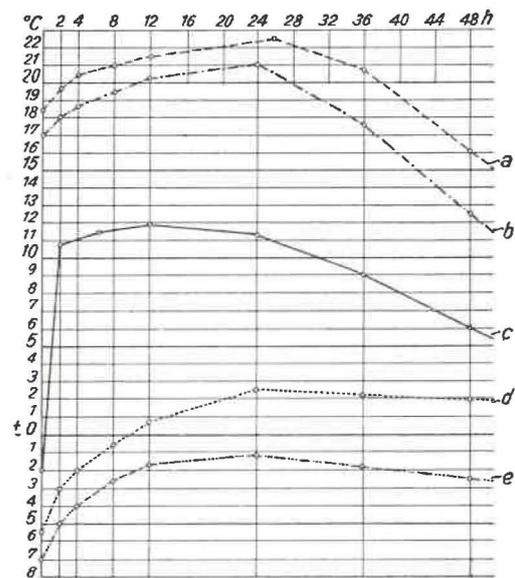


Fig. 5. — Réchauffement de la maçonnerie antigel pendant les deux premiers jours.

Le béton dans la zone de contact s'échauffe de 14° C.

a briques;

b béton solidifié;

c zone de contact avec le terrain;

d à 40 cm dans le terrain;

e à 120 cm dans le terrain.

L'avancement moyen sur toute la longueur des deux puits, tout compris, a été de 26 m par mois et on a atteint un maximum de 33,5 m.

Le dégel s'est fait naturellement au premier puits et avec courant d'air chaud au second. Dans le premier cas, l'équilibre de température a été obtenu après 12 mois et, dans le second cas, après 8 mois. Dans chacun, les sables bouillants ont été en retard de 2 à 3 mois. Ce sont les 50 m supérieurs qui ont été les plus difficiles à dégeler, bien que contenant peu d'eau; mais la température de la saumure circulant dans les tubes a été constamment inférieure de 2 à 3° à celle du fond.

Cimentation finale sous pression.

Après dégel complet des deux puits et du terrain, on a procédé à des injections de ciment sous pression. Des tubes avaient été emprisonnés dans la maçonnerie lors de la pose; leur longueur était juste égale à l'épaisseur et ils étaient perforés à leur extrémité voisine du terrain. On a injecté un lait de ciment additionné de produits chimiques pour hâter la prise. Cette injection avait pour but de boucher complètement le joint entre la tour et le terrain et d'obturer les fissures qui auraient pu exister dans la masse de béton après des variations de température de -15° à +15° C. La pression d'injection a été en général de 25 atm, exceptionnellement elle est montée à 80; on a commencé par le bas. Par mesure de contrôle et de sécurité, 4 à 8 tubes des assises supérieures étaient reliés à la pompe. Le résultat de cette opération a été tel que les suinte-

ments d'eau le long du puits n° 2 n'ont pas dépassé 5% de la venue évaluée par le terrain.

Emploi du temps.

Le temps employé à ce fonçage par congélation se répartit comme suit en pourcents, pour chacun des deux puits :

	N° 1	N° 2
Installations et préparatifs	12	8 %
Sondages	30	32 %
Congélation avant creusement	15	17 %
Fonçage et muraillement	33	35 %
Cimentation et divers (guidage)	10	8 %

Par raison d'économie, les deux puits devaient être foncés en employant le même matériel pour les sondages, la congélation et l'extraction. En combinant les phases du travail, on est arrivé au deuxième puits à épargner, comparativement au premier, 35 % sur le temps des sondages et 40 % sur le temps de la congélation, 25 % sur le fonçage, parce qu'il y avait coïncidence de certaines opérations. Par exemple pendant qu'on exécutait les deux derniers sondages au puits n° 1, on a transporté deux treuils au puits n° 2 et, pendant qu'on détubait et posait les congélateurs au n° 1, on sondait au n° 2 depuis des mois.

Les sondages ayant été terminés plus tôt au puits n° 2 et la congélation pouvant être considérée comme satisfaisante au puits n° 1 sans qu'elle ait atteint tout à fait la profondeur totale, on a pu commencer à congeler aussi le puits n° 2, et par conséquent hâter le début du fonçage. C'est ainsi que le temps requis par le n° 2 n'a été que 65 % de celui du n° 1. En tout, le travail a duré 6 1/2 ans.

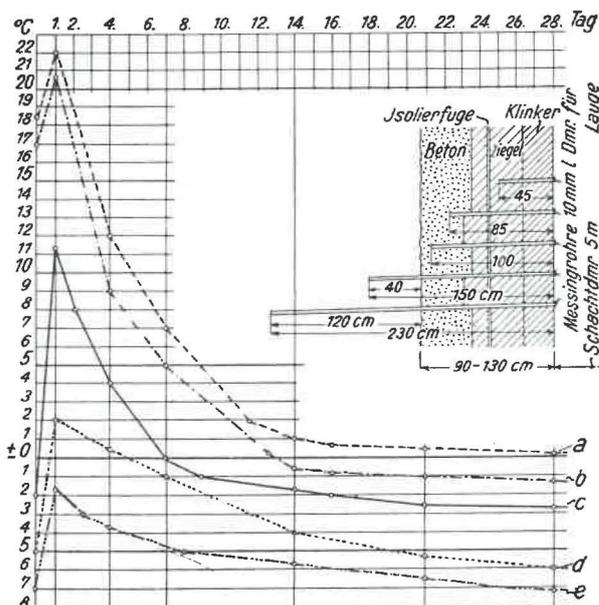


Fig. 6. — Températures pendant 28 jours.

- a joint de mortier dans la tour en briques;
- b béton;
- c zone de contact;
- d à 40 cm dans le terrain gelé;
- e à 120 cm dans le terrain gelé.

Voici les principales dépenses en matériaux :
 2.300.000 briques; 9.500 m³ de gravier pour bétons; 1.200 m³ de sable; 2.100 t de ciment; 16.000 m de tubes congélateurs; 15.000 m de tubes adducteurs; 92.000 kg de CO₂ liquéfié; 140 t de chlorure de calcium à 98 p. c.; 210 t de matière isolante.