la projection violente des pierres détachées par les mines, contre le garnissage en queues de perche et fascines de la cheminée.

Le Comité a ensuite estimé que l'existence d'un boisage supplémentaire établi dans la cheminée, entre les cadres verticaux, aurait vraisemblablement empêché l'accident.

Les deux systèmes de boisage envisagés ont été les suivants :

1° bêles transversales calées entre toit et mur, à l'intérieur des bêles verticales, et reliées entre elles par des étançons.

2° le boisage « en plat » consistant en cadres horizontaux constitués de deux bêles horizontales calées contre les bêles verticales du boisage « en droit » à l'aide de deux étançons, placés dans les plans des étançons du boisage en droit.

L'Ingénieur qui a procédé à l'enquête a conseillé à la direction de la mine l'emploi systématique de ce dernier système.

MÉMOIRE

Etude

sur

les Fonçages de Puits en Campine

PAR

C. GUION (1)

Ingénieur civil des Mines.

Assistant de Géologie à l'Université de Liége.

(1) Agé de 24 ans, lauréat du Concours Universitaire, passionné des questions scientifiques, M. Guion est mort avant la publication de ce mémoire. Ainsi a pris fin prématurément une carrière qui débutait et s'annonçait particulièrement brillante. La mort de M. Guion a plongé dans la consternation tous ceux qui connaissaient ce jeune ingénieur et qui avaient pu apprécier ses remarquables qualités ; tous ont pris une vive part à la grande douleur de sa famille.

Nous remercions vivement M. Guérin, Ingénieur principal des Mines à Liége et Répétiteur d'exploitation des Mines à l'Univesité de cette ville, d'avoir bien voulu se charger de la correction des épreuves de ce mémoire.

La Rédaction.

A LA MEMOIRE

DU

GRAND INGÉNIEUR

Louis SAUVESTRE

qui sut mener avec succès

le Fonçage des Puits

de

Beeringen.

AVANT-PROPOS

Le 8 août 1901, le premier recoupement par sondage d'une veine de houille se faisait à Asch au cours des recherches entreprises sur l'initiative hardie d'André Dumont fils.

Ainsi se vérifiait l'hypothèse déjà théoriquement démontrée de l'existence d'un bassin houiller au Nord de la Belgique, sous l'aride et immense Campine.

Les campagnes de sondages immédiatement entreprises allaient reconnaître la richesse, l'importance et l'extension de ce nouveau bassin et, en même temps, permettre l'étude détaillée et complète des terrains secondaires et tertiaires dont la nappe épaisse masquait et recouvrait le terrain houiller exploitable. Ainsi, parallèlement à la révélation d'une immense richesse minière, apparaissaient les difficultés et les formidables obstacles qui en défendaient l'accès : 400 à 600 mètres de terrains stériles renfermant jusqu'à quatre et cinq nappes aquifères dans des sables boulants, du tuffeau, des craies fissurées à des profondeurs qui atteignaient plus de 600 mètres, leur donnant des pressions hydrostatiques de 60 atmosphères et plus.

Cependant, le génie des Industriels et Ingénieurs belges n'était point inférieur à celui de ses savants Géologues.

Successivement, pendant l'année 1906, diverses sociétés obtenaient de l'Etat les concessions suivantes :

André Dumont-sous-Asch;
Les Liégeois;
Helchteren;
Zolder;
Genck-Sutendael;
Beeringen-Coursel;
Sainte-Barbe;
Guillaume Lambert.

Dans la suite, en 1911, fut accordée la concession de Houthaelen; en 1912, la concession de Winterslag fut détachée de celle de Genck-Sutendael et, en 1924, fut octroyée la concession d'Oostham-Quaedmechelen.

La plupart des sociétés s'attelaient immédiatement à la tâche, poursuivaient les travaux de recherches sur leur concession, mettaient à l'étude la mise en exploitation et l'organisation des travaux préparatoires.

Le creusement du premier puits était entrepris en mars 1912 à Winterslag, après achèvement des travaux de congélation.

En mai 1912, les travaux de creusement commençaient à Kleine Heide, sur la concession de Beeringen, où les premiers travaux de mise en train du fonçage avaient été entrepris dès 1910. Le 4 juin de la même année, le creusement commençait à Waterschei. Enfin, le terrain houiller était atteint à Winterslag le 28 juillet 1914 à 484 mètres et après maintes difficultés et malgré le retard dû à la guerre 1914-1918, l'exploitation commençait à Winterslag même en octobre 1917.

Actuellement, six sièges sont exploités et en complète activité.

Sur l'immense champ minier de Campine, les sondes continuent à fouiller.

La production toujours croissante, l'extension industrielle qui se manifeste en Campine et ira grandissante sitôt cette province dotée de puissants moyens de communications par terre et par eau, soulignent la prospérité de ce nouveau centre minier.

Quatre à six cents mètres de morts-terrains et de multiples et importantes nappes aquifères à traverser dans des conditions de pressions particulièrement élevées, des puits à foncer et à soutenir ainsi jusqu'à 700 et 800 mètres : l'industrie belge n'a reculé devant aucune hardiesse.

C'est l'oeuvre splendide que constitue le fonçage des puits en Campine, c'est l'enseignement pratique que l'Ingénieur peut retirer de ce travail que nous nous proposons de condenser en ce mémoire, en réponse à la question posée par le Jury du Concours Universitaire pour la période 1927-1929.

SOMMAIRE.

I. — *Etude générale et comparative des procédés de fonçages de puits utilisés en Campine.*

Esquisse géologique du Bassin . . . . . .
Les terrains paléozoïques. — Les morts terrains. — Les nappes aquifères. — L'importance des procédés de sondages dans la reconnaissance des terrains.

Choix des procédés de fonçage . . . . . .

Le procédé de fonçage par congélation . . . . . .
Les terrains congelés : facilité de congélation des terrains. — Résistance des terrains congelés. — Mouvements de terrains résultant de la congélation.

La réalisation de la congélation. — Réalisation d'un mur de glace. — Réalisation des basses températures. — Précautions à prendre dans le montage de l'installation. — Marche de la centrale frigorifique. . . . . .

Forage des sondages de congélation . . . . . .

Appareils de contrôle de la verticalité des sondages . . . . .
Mesure des déviations. — Appareils de mesure. — Appareil d'Erlinghagen. — Appareil de Gebhardt. — Téléclinographe Denis. — Résultats obtenus : Charbonnages de Waterschei, de Beeringen, Ste-Barbe, de Winterslag, Les Liégeois. — Conclusions.

Reprise de congélation en profondeur . . . . . .
Travail effectué à Beeringen. — Travail effectué aux Charbonnages André-Dumont. — Conclusions.

La décongélation . . . . . .

Fonçage avec cimentation préalable . . . . . .
Influence des terrains sur la cimentation. — Importance des passes cimentées d'une seule venue. — Réalisation en Campine. — Résultats. — Conclusions. — Détails de réalisation.

Cimentation postérieure au creusement . . . . . .

Cuvelage et revêtement . . . . . .
Cuvelages utilisés en Campine. — Etablissement du cuvelage. — Joints de cuvelage. — Vérification du cuvelage. — Réparation des pièces du cuvelage. — Accidents.

Annere . . . . . .
Revêtements en maçonnerie et béton à la traversée de morts-terrains. — Revêtement en terrains cohérents.

Trousses et raccords de cuvelage . . . . . .
Trousses. — Raccords de cuvelage. — Conclusions.

Revêtement provisoire . . . . . .
Critique. — Conclusions. — Réalisation.

Appareillage et Outillage du creusement . . . . . .
Organisation du travail. — Outillage. — Les explosifs. — Plancher de travail. — Appareillage en surface.

Epuisement . . . . . .

Fermeture des puits . . . . . .
Recongélation d'un puits en décongélation . . . . . .
Méthode rationnelle de congélation.
Conclusions . . . . . .
Procédés de fonçage : en cas de fonçage avec congélation préalable ; en cas de cimentation de certaines passes ; en cas de reprise de congélation.

II. — *Etudes monographiques des travaux de fonçage des puits dans les différents Charbonnages de Campine.*

1. — Charbonnages de Beeringen.
2. — Charbonnages de Helchteren-Zolder.
3. — Charbonnages des Liégeois.
4. — Charbonnages de Winterslag.
5. — Charbonnages André-Dumont.
6. — Charbonnages de Limbourg-Meuse.

ÉTUDE GÉNÉRALE ET COMPARATIVE

DES

Procédés de Fonçage des Puits

UTILISES EN CAMPINE

CHAPITRE I.

Esquisse Géologique du Terrain

Maintenant volontairement à l'écart les questions de structure tectonique ou stratigraphie que peuvent poser la constitution géologique du bassin houiller de Campine et la nature des sédiments secondaires et tertiaires qui recouvrent le socle paléozoïque, nous nous bornons ici à tracer une brève esquisse de l'allure générale du bassin et de son recouvrement de morts-terrains, de manière à indiquer et à faire ressortir quelles difficultés naturelles furent révélées lors des sondages de reconnaissance, ou se marquèrent au cours des travaux.

1. — LES TERRAINS PALEOZOIQUES

Le houiller se présente généralement dans la partie actuellement exploitée en grandes plateures faiblement inclinées de 10 à 15° vers le Nord-Nord-Est. La reconnaissance du calcaire carbonifère recoupé par divers sondages a permis d'établir la limite méridionale du bassin.

La partie connue et exploitée actuellement en Belgique appartient au flanc méridional d'un synclinal assez

plat dirigé sensiblement Est-Ouest. La frontière belgo-hollandaise limitant politiquement le bassin exploitable en Belgique, n'y laisse vraisemblablement que le flanc méridional du synclinal.

Ce bassin est recoupé par une série de failles radiales dirigées NW-SE, vraisemblablement associées aux failles d'effondrement du Rhin et qui divisent le gisement exploité comme une réelle marquetterie.

La stratigraphie du houiller de Campine comporte les termes suivants :

Un faisceau de base dénommé faisceau de Westerloo, correspondant au Namurien du bassin de Liége-Charleroi ;

Un faisceau dit de Norderwyck ;

Une petite stampe stérile ;

Un faisceau dit de Beeringen.

Ces trois termes correspondraient à l'assise de Châtelet. Après une grande stampe stérile viennent les deux assises riches dénommées faisceau de Genck et faisceau d'Asch, séparés par une stampe pauvre.

Ces différentes assises apparaissent successivement sous les morts-terrains à mesure que l'on monte vers le Nord.

Le relief sous les morts-terrains du socle paléozoïque se présente avec une pente régulière et assez uniforme vers le Nord. L'existence des failles radiales qui ont joué pendant les temps post-houillers et même après le dépôt des terrains crétacés et tertiaires, interrompt seule la régularité de ce relief.

La conséquence pratique est donc la richesse croissante du terrain houiller à mesure que l'on monte vers le Nord, l'existence d'une bande méridionale pauvre et stérile, mais également l'épaisseur croissante des morts-terrains à mesure que l'on va vers le Nord. Ainsi, les différents puits creusés ont recoupé la tête du houiller à des profondeurs différentes.

Ce sont, en allant du Sud au Nord :

Winterslag	480 m.	(— 400 m.	en	cote	absolue) ;
Waterschei	505 m.	(— 425 m.	»	»	) ;
Zwartberg	555 m.	(— 482 m.	»	»	) ;
Voort	603 m.	(— 530 m.	»	»	) ;
Beeringen	622 m.	(— 575 m.	»	»	).

Le puits d'Eysden recoupe le houiller sous 473 mètres de morts-terrains.

* * *

Comme terrains paléozoïques, on a cru reconnaître au Nord de la zône actuellement exploitée, dans les termes de base des morts-terrains, des roches de couleur rouge vive un peu salifères : des roches permiennes ou, en tous cas, permo-triasiques. Ces terrains seraient transgressifs et discordants sur le houiller.

2. — LES MORTS TERRAINS

Le socle paléozoïque indique nettement une érosion subie pendant les temps crétacés. Les seuls terrains antérieurs au Senonien qui paraissent marquer une discordance sur le houiller sont les roches mentionnées plus haut comme permo-triasiques.

Il convient toutefois de noter qu'un sondage creusé à Neeroeteren a recoupé, de 755^{m},50 à 844^{m},14, des terrains jurassiques (hettangien et rhétien).

Les termes crétaciques tels qu'ils ont pu être reconnus en détail à Beeringen donnent la succession suivante de haut en bas :

Maestrichtien :

Tuffeau avec parfois des bancs durs et cristallins ;

Tuffeau à silex gris et noirs ;

Craie grossière glauconifère ;
Gravier à petits galets de quartz et glauconie.
Senonien :
Craie grise grossière à silex gris ;
Craie blanche fine à silex noirs ;
Marne grise ;
Sable argileux glauconifère très tendre.

L'épaisseur de ces terrains est à Beeringen de 244 mètres et de 177 mètres à Winterslag. Les bancs s'amincissent donc vers le Sud. Certains niveaux se réduisent, prennent une composition quelque peu différente et même disparaissent. Ainsi, par exemple, le niveau sableux de base du Senonien.

Le Tertiaire présente la succession suivante à Beeringen :

Diestien : sable vert avec gravier ;

Rupelien : sables alternant avec argiles sur quelques mètres, puis une argile compacte sur 70 mètres environ. En-dessous, quelques mètres de sables gris blanc avec cailloux roulés ;

Tongrien : principalement constitué par des sables avec quelques intercalations argileuses ;

Landenien : argiles avec bancs de lignites et sables micacés et marnes.

De nombreux termes du tertiaire manquent. Il y a de profondes variations entre cette coupe et celles connues plus méridionalement dans la vallée du Geer et vers Louvain : ce qui indique de nombreux mouvements de transgression et régression.

Ceux-ci ont eu lieu dans la direction Nord-Sud et Ouest-Est. La variation des niveaux dans l'étendue des concessions que nous considérons est peu sensible. Nous avons surtout à nous préoccuper de la nature des roches

constituant les morts-terrains et des effets qu'elles entraînent dans le fonçage.

Ces roches sont de divers types :

Les *craies fissurées compactes du crétacé et les marnes* sont des roches qui se maintiennent facilement. Le *tuffeau* se présente comme une roche poreuse à grains assez fins, laissant passer facilement l'eau, mais, par contre, faisant aisément filtre pour rejeter les substances en suspension dans l'eau.

Parmi les *argiles*, il y en a qui sont assez résistantes, mais la plupart de ces argiles présentent une plasticité assez grande, spécialement les bancs d'*argile à lignites*.

Du fait de cette plasticité, il peut se produire sous l'action de poussées verticales des flux de matière, donnant soit des poussées horizontales aux parois, soit des soulèvements du fond. A la suite de ces mouvements de terrains, des accidents graves peuvent survenir : écrasement des tubes, calage du revêtement, mise sous tension variable de certains organes.

Les bancs de *sables* présentent enfin, avec leur peu de consistance propre et leur propension à l'éboulement, le danger d'être le siège de nappes aquifères.

C'est d'ailleurs l'existence de ces nappes aquifères dans les morts-terrains qui constituait la principale difficulté de la traversée des morts-terrains, difficulté qui se compliquait alors par la nature des roches qui les contiennent.

3. — LES NAPPES AQUIFERES

Les principales nappes aquifères sont contenues dans le tertiaire et dans le crétacé supérieur.

On peut dire pratiquement que *tous les niveaux sableux du tertiaire sont aquifères*. Ces différentes nappes sont isolées par des bancs puissants d'argile. Les niveaux

aquifères principaux sont dans le Diestien et le Tongrien. Ces nappes sont séparées par l'importante assise d'argile rupélienne. En-dessous du Tongrien, les argiles landeniennes séparent les nappes du tertiaire des nappes sous jacentes. Ces deux niveaux argileux et spécialement celui du Landenien on donné lieu, lors du creusement, à des poussées violentes qui ont parfois amené d'assez graves conséquences.

La *partie supérieure du Crétacé est le siège également d'une importante nappe équifère*. Celle-ci occupe le niveau du tuffeau maestrichtien et s'étend dans une partie des craies cohérentes fissurées. Cette nappe a présenté de nombreuses difficultés lors du fonçage. En effet, si la nappe aquifère dans la craie n'a guère présenté de difficultés vu la nature cohérente de la roche et la limitation des venues d'eau aux fissures qui traversent cette masse, il n'en était pas de même pour le tuffeau.

Dans cette roche, les venues d'eau se produisent non seulement par les fissures de la masse, mais encore et surtout à cause de la porosité de la roche. Cette porosité, comme nous l'avons cité plus haut, associée à la nature des grains, joue le rôle de filtre et empêche toute cimentation de la roche. Le ciment est rejeté par la roche et l'eau seule la pénètre.

Outre ces nappes, il existe enfin à la base des morts-terrains *une nappe localisée dans les sables herviens de base du senonien*. Cette dernière nappe n'a pas été rencontrée dans tous les puits. Ainsi, elle est inexistante à Winterslag. Cette nappe a peu de puissance : 5 à 10 mètres à Waterschei, 15 mètres à Beeringen, mais elle a présenté de l'importance lors du creusement par suite des conditions dans lesquelles cette nappe se trouvait : sables boulants, débit élevé, pression atteignant à Beeringen jusqu'au-delà de 60 atmosphères.

4. — DE L'IMPORTANCE DES PROCEDES DE SONDAGE DANS LA RECONNAISSANCE DES TERRAINS.

La connaissance détaillée des morts-terrains était nécessaire avant d'établir tout projet d'ouvrage d'art important. En effet, pour déterminer la nature des travaux à exécuter, pour réaliser la traversée des terrains aquifères, il faut établir soigneusement les conditions dans lesquelles se trouvent ces nappes, spécialement les conditions de pression, de débit et la nature des roches qui contiennent ces nappes.

La connaissance de la nature des roches est nécessaire pour permettre d'établir avec certitude et toute garantie, le traitement à leur faire subir afin d'empêcher des venues abondantes dans le puits : cimentation ou congélation. En effet, *c'est la nature même des roches qui influe sur la facilité de la cimentation ou de la congélation*.

De plus, il est nécessaire de bien connaître les conditions auxquelles se trouveront soumis les revêtements provisoires et les autres organes qui seront utilisés pour le fonçage tels que : tubes congélateurs, colonnes et tubes de sondage.

Le procédé de sondage employé pour les reconnaissances doit le plus possible donner des résultats d'où l'on puisse déduire les données désirables.

Au cas où quelques-unes de ces données n'ont pu être déterminées lors des sondages de reconnaissance, il est nécessaire d'exécuter des travaux supplémentaires au cours du creusement, spécialement pour déterminer les venues d'eau et les pressions hydrostatiques des nappes.

Nous examinerons ces questions en détail dans un chapitre ultérieur.

CHAPITRE II.

Choix des procédés de fonçage

Le fonçage des puits de Campine posait aux entrepreneurs de graves problèmes.

L'expérience de prédécesseurs manquait totalement à l'entreprise d'un travail d'une telle envergure.

En effet, avant 1910, date à laquelle le creusement des puits de Campine fut entrepris, des travaux de même ordre exécutés par divers procédés, aucun n'avait été mis à l'épreuve dans de telles conditions.

Les conditions rencontrées en Campine ne permettaient pas l'emploi d'un procédé par épuisement, les venues étant trop intenses et les profondeurs trop grandes. Le creusement maximum avait été atteint à Durham avec 200 mètres de profondeur. La venue d'eau maximum avait été de 54 mètres cubes par minute. L'installation d'épuisement mobilisait 18 pompes, encombrant ainsi tout le puits et augmentant les frais d'installations des sièges.

Restaient seuls en présence comme procédés possibles :

Le creusement à niveau plein;

Le creusement après congélation préalable;

Le creusement après cimentation des passes aquifères.

Le *procédé à niveau plein* comporte : le creusement par trépan actionné à l'air comprimé, sous l'eau, qui s'établit dans le puits ainsi creusé au niveau naturel des eaux de la région. Ce procédé exige un appareillage compliqué de trépans percuteurs, tiges, appareils de manoeuvres, etc. Il présente l'inconvénient d'un travail non contrôlable directement, pouvant entraîner des déviations considérables et amener des accidents tels que ruptures de tiges, d'où des retards et recherches difficiles.

Ce procédé exige également une série de manoeuvres longues et difficiles par suite de l'alternance de périodes relativement courtes de battage et de curage. En terrains consistants, les parois peuvent présenter suffisamment de résistance à l'éboulement pour ne pas réclamer un soutènement provisoire. En terrains meubles et, à plus forte raison, en traversant les passes de sable ébouleux, un revêtement s'impose. Il ne peut être réalisé qu'à l'aide d'un cuvelage descendant avec trousse coupante, descente qui, si elle est notablement facilitée par le creusement préalable au fond par le trépan, ne reste pas sans danger de coincement, d'arrêt, entraînant l'obligation de réduire le diamètre du puits par descente d'un nouveau revêtement intérieur.

Le procédé Honigman, à l'eau lourde, supprime la trousse coupante et permet de faire le cuvelage après le creusement comme dans le procédé Kind Chadem.

La descente de ces tours a rarement dépassé 175 mètres avec une réussite complète. De plus, l'obligation de tuber plusieurs passes ébouleuses amène des rétrécissements notables du puits. Ces accidents deviennent d'autant plus fréquents que le fonçage se fait à plus grande profondeur; aussi, de tels procédés ne sont applicables qu'à des puits en terrains suffisamment résistants et présentant peu de masses ébouleuses.

De tels fonçages, réalisés par le procédé Kind-Chaudron, ont atteint la profondeur maximum de 430 mètres. La profondeur maximum atteinte en Belgique fut de 319 mètres.

Diverses variantes du procédé peuvent être appliquées : le Kind-Chaudron avec battage par un trépan unique; le procédé Wolsky, plus rapide grâce à la multiplicité de trépans plus légers; le procédé Stockfisch, de creusement spécial par battage à niveau plein en terrains ébouleux

sans revêtement, les terrains étant maintenus en parois par l'injection d'un liquide dense.

L'avancement, dans les profondeurs atteintes, est de l'ordre de 8 à 10 mètres par mois. L'influence de la profondeur se marque d'autant plus nettement qu'elle est plus grande. L'examen de nombreuses statistiques amène à constater que ces procédés ne donnent un prix de revient favorable que pour des profondeurs de 200 à 300 mètres.

En résumé, *les procédés de fonçage à niveau plein parurent peu favorables aux puits de Campine.*

Cependant, *le Charbonnage de Helchteren-Zolder, à Voort*, où le houiller est atteint à 605 mètres, *envisagea un moment de réaliser le fonçage par le procédé Stockfisch.*

La réussite des procédés employés par les autres concessionnaires décida le Charbonnage de Helchteren à abandonner le projet et à entreprendre le fonçage par congélation.

PROCEDE DE FONÇAGE PAR CONGELATION

La congélation des terrains que doit traverser le puits permet d'opérer le fonçage sans aucune venue d'eau.

Par suite de la congélation de l'eau des nappes aquifères, les grains de la roche sont comme cimentés les uns aux autres, par la glace et constituent ainsi par eux-mêmes un soutènement et un cuvelage provisoire qui permet d'effectuer le fonçage en toute sécurité.

Les points essentiels, dans la réalisation de cette opération, sont : les *moyens de provoquer la congélation en profondeur et de rendre l'épaisseur du mur de glace ainsi réalisé, suffisante pour résister à la pression hydrostatique.*

Ensuite, *maintenir ce mur pendant toute la durée du travail de fonçage* et *mener le creusement de telle manière qu'aucune fissure, aucune brèche ne se produise dans ce soutènement.*

L'obtention de cette congélation est réalisée par la circulation dans des tubes enfoncés à profondeur suffisante, d'un liquide à basse température amenant l'eau des nappes, par conductibilité réfrigérante, à une température inférieure à 0°, de manière que la roche soit ainsi transformée en une masse cohérente.

Ces tubes seront en nombre suffisant et disposés de manière à réaliser une mur continu, étanche et suffisamment épais. Lorsque la masse aura fait prise, le creusement pourra être entrepris avec certitude.

Les principaux points à considérer sont : *l'influence de la température* et, par suite, *de la profondeur*; la *réalisation d'un mur d'une étanchéité et d'une épaisseur suffisantes;* la *résistance même de ce mur à la pression qui va croissant avec la profondeur;* l'*influence de la congélation sur les tubes* afin d'éviter tout danger de rupture de ceux-ci; la *manière dont la glace se comporte dans les hautes pressions* et les *conditions de travail* optima pour réduire les causes possibles de rupture du muraillement en terrains congelés : explosifs, creusement, etc.

Les résultats obtenus précédemment avaient été satisfaisants, mais les profondeurs atteintes n'étaient en Belgique que de 330 mètres, au Charbonnage du Levant du Flénu et en Allemagne, de 415 mètres.

Le procédé avait été reconnu excellent pour tous les terrains aquifères, la glace se comportant comme une matière suffisamment résistante.

Les méthodes de contrôle de la déviation des sondages présentaient seules quelques difficultés et manquaient de précision.

Les résultats obtenus antérieurement, malgré les incer-

titudes quant à la verticalité des sondages, et qui seraient d'autant plus importantes que l'on irait plus profondément, décidèrent *la plupart des sociétés à se rallier au principe de la congélation.*

Mais, dans le cas qui nous occupe, la congélation devait être portée à une profondeur bien supérieure à celle atteinte précédemment.

Comment le terrain se comporterait-il sous les fortes pressions qui règnaient entre autres aux profondeurs où stagnait la nappe aquifère du Hervien?

Comment remédier au peu de précision de la verticalité des sondages, condition essentielle et primordiale pour l'étanchéité du muraillement provisoire?

Des clartés et des solutions de ces problèmes allaient être trouvées au cours du travail entrepris, mais, dès l'abord, hardiment, les divers concessionnaires adoptèrent le principe de la congélation.

Au *Charbonnage de Winterslag*, on entreprendrait la congélation jusqu'à la profondeur de 430 mètres, sous la dernière nappe importante. Un niveau aquifère, moins important, situé plus bas, serait laissé intact. On envisagerait le mode de fonçage à réaliser quand le creusement atteindrait cet horizon et que l'on possèderait de meilleures données sur les conditions de cette nappe.

Les *Charbonnages André-Dumont et de Beeringen* adoptèrent le procédé par congélation pour la traversée des nappes aquifères du tertiaire jusqu'au niveau de 400 mètres. Les sables, marnes et argiles ne permettaient l'emploi d'aucun autre procédé.

Pour les nappes crétacées sous-jacentes, la Direction abandonnait le principe de la congélation, envisageant et réalisant le procédé par cimentation. Enfin, pour la nappe inférieure du Hervien, le manque de document précis sur les conditions de consistance des terrains, de pression

et de débit de la nappe, laissait la question en suspens. En cas de terrains non boulants et de débit réduit, on tenterait la traversée par simple épuisement. Dans le cas contraire, on exécuterait une reprise de congélation à ce niveau, projet hardi et nouveau, car cette reprise se ferait sous 63 atmosphères de pression à 550 mètres de profondeur, profondeur jamais atteinte par le procédé de congélation.

Les *Charbonnages de Limbourg-Meuse*, à Eysden, décidèrent d'opérer par une seule passe de congélation pénétrant de 45 mètres dans le houiller et réalisant ainsi un joint étanche avec le terrain cohérent non aquifère. La congélation sera ainsi réalisée sur une hauteur de 528 mètres.

Les *Charbonnages des Liégeois* l'adoptaient également et ceux de *Helchteren-Zolder*, après abandon de leur premier projet, s'y ralliaient à leur tour.

Ainsi, sous des variantes différentes, les concessionnaires de Campine adoptèrent le procédé de congélation comme le meilleur, le plus sûr et le plus rapide des procédés modernes.

L'effort tenté allait être couronné de succès. Il devait provoquer des études et permettre des constatations intéressantes pour le progrès et le développemen de ce procédé.

* * *

Le procédé par congélation était-il le seul utilisable dans les conditions posées en Campine?

Le procédé par cimentation préalable consiste à créer à l'endroit envisagé pour le creusement du puits, un monolithe de béton dont la hauteur est suffisante pour englober la nappe aquifère et au travers duquel il sera aisé alors de creuser le puits comme si l'on travaillait en terrains cohérents.

Le ciment est injecté dans la roche et constitue, avec les éléments de celle-ci, un béton résistant dont l'anneau laissé intact sur toute la périphérie, lors du creusement du puits, constitue un revêtement suffisamment étanche et résistant pour parer à toute infiltration et poussée des nappes aquifères.

Immédiatement, on remarque les avantages de ce procédé. Il est bien plus rapide que la congélation et n'exige qu'un matériel très simple.

La cimentation préalable terminée, le creusement peut être entrepris sans qu'il soit nécessaire de maintenir une installation spéciale en ordre de marche. Le creusement peut être mené avec moins de précaution que dans le cas de la congélation.

Par contre, la cimentation exige, pour être parfaite, des conditions spéciales : un terrain assez cohérent, fissuré, où le ciment puisse se déposer sans crainte d'être filtré ou perdu.

Cet inconvénient élimine l'emploi absolu et unique du procédé de cimentation dans le fonçage des puits de Campine. Il n'est pas possible, en effet, de réaliser la cimentation des terrains sableux du Tertiaire, ni du tuffeau.

Le procédé avec silicatisation préalable fut essayé, mais ne donna aucun résultat intéressant.

Mais *le procédé par cimentation pouvait être et a été réalisé en combinaison avec le procédé de congélation.* On cimenta certaines passes du crétacé. La craie principalement et le tuffeau croyait-on, grâce à leurs fissures et fractures, constituaient des roches propres à cimentation. Le niveau aquifère du crétacé se trouvant à grande profondeur, on ignorait comment la congélation s'y réaliserait et quelle chance de succès elle présentait. Comment se comporterait l'anneau de glace à cette profondeur? Le bloc monolithique de terrains cimentés constituait une masse suffisamment résistante et donnait l'espoir d'une entière sécurité. Aussi son emploi fut-il envisagé dès le début à Beeringen et à André-Dumont entre autres, et fut-il employé à diverses occasions dans le creusement d'autres puits.

Ainsi donc :

Congélation des morts-terrains en une seule passe sur toute l'épaisseur des dépôts secondaires et tertiaires;

Congélation de certaines passes avec reprises en profondeur;

Congélation associée à l'emploi de la cimentation à la traversée de certains niveaux,

furent les trois modes de fonçage employés en Campine.

Ce sont les modalités de ces procédés, les particularités remarquées, les aménagements spéciaux réalisés et les constatations finalement obtenues, que nous étudierons dans les chapitres qui vont suivre.

CHAPITRE III.

Le Procédé par congélation

Ainsi que nous l'avons indiqué précédemment, le procédé par congélation consiste à créer à l'intérieur de la masse aquifère un anneau épais et cohérent à l'abri duquel il suffira de creuser comme en terrain sec, avec ou sans soutènement suivant l'état des parois laissées à nu au creusement. Les nappes aquifères étant congelées ne présentent plus de danger pour le creusement : il suffit que l'anneau de terrain congelé laissé alentour du puits soit suffisamment résistant pour ne pas céder sous l'action des pressions des nappes, ni se fissurer, donc un mur de glace étanche autour de puits et de résistance suffisante.

Il est donc de première nécessité d'établir d'abord les conditions de résistance des terrains congelés.

1. — LES TERRAINS CONGELES

Dans la question de congélation des terrains, leur nature intrinsèque intervient à différents points de vue.

Elle intervient, en effet :

1° Dans la facilité de prise des terrains;

2° Dans la résistance de ces terrains aux pressions;

3° Dans la nature et l'intensité des phénomènes et des mouvements qui se produisent du fait de la congélation.

Nous allons observer successivement, à ces différents points de vue, les faits connus au début des entreprises en Campine, les constatations que l'on peut tirer de ces travaux, la contribution importante qu'ils ont apportée à notre connaissance des terrains.

Facilité de Congélation des Terrains.

M. Zaeringer, spécialiste des questions de congélation, avait établi dans une note publiée à un congrès en 1910 à Dusseldorf, quelques conclusions déduites des travaux entrepris en Allemagne et autre part.

Ces conclusions peuvent se résumer ainsi :

Les *sables présentent une grande facilité de congélation.* Celle-ci est d'autant plus rapide qu'ils sont plus imprégnés d'eau.

Les *argiles sont beaucoup plus difficilement congelables* du fait de leur imperméabilité d'abord et du grain plus fin de leur substance.

Les *lignites offrent une très grande difficulté à la congélation.* Ceci dépend principalement de leur nature même de substance charbonneuse, mauvaise conductrice. Même imprégnés d'eau, les lignites se congèlent plus difficilement que les argiles.

Au cours des fonçages exécutés en Campine, on a pu en suivant la vitesse de fermeture des murs de glace, souligner les différences principales qui se présentent dans l'aptitude à la congélation des différents terrains.

Au Charbonnage de Beeringen : le mur de glace se ferma d'abord dans les sables tertiaires et ensuite dans la craie et le tuffeau du crétacé. Ces terrains étaient plus profonds, mais l'écart entre la prise des sables et celle du crétacé était tellement important qu'il ne pouvait être attribué au surcroît de profondeur. Il y avait *un notable ralentissement de la prise dans le cas des craies.*

Au creusement, on nota que *les argiles avaient pris plus difficilement la congélation.* Les températures remontaient au passage de ces assises et *les lignites intercalés dans le Landenien étaient très peu consistants* et avaient très mal pris la congélation.

Au Charbonnage de Helchteren et Zolder : le mur de glace se ferma d'abord dans les sables et successivement de haut en bas. La nappe crétacée présenta un retard considérable à la prise en paroi continue.

Des mesures de température des parois ont pu être effectuées au cours du creusement.

Au puits n° 1, on a ainsi relevé à 152 mètres dans les argiles 2°, alors que les sables supérieurs atteignaient 0° et — 1°, à 190 mètres dans le sable landenien — 5°,9, et à 324 mètres dans le tuffeau : — 3°.

Dans les argiles, il n'y a pour ainsi dire pas d'eau à congeler ; mais, au contact des congélateurs, il y a simple refroidissement. La prise est plus difficile dans le tuffeau que dans les sables.

Au puits n° II, on a pu, par des descentes successives d'un thermomètre bombé dans le sondage central, déterminer au fur et à mesure de la formation du mur de

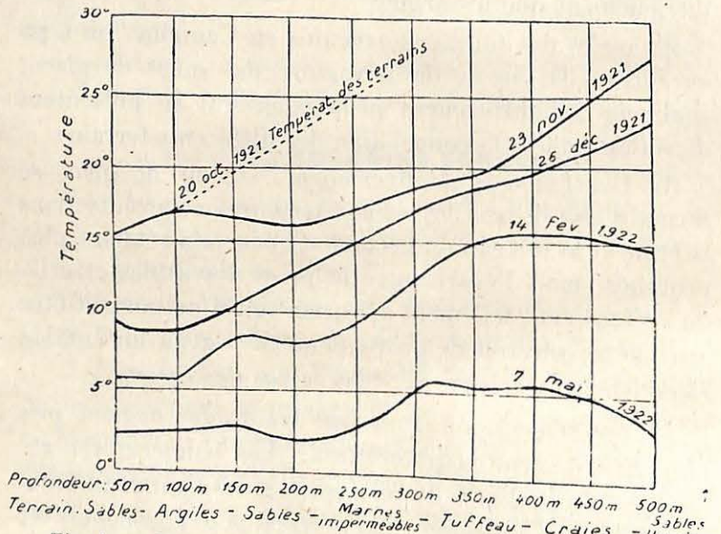


Fig. 1. — Diagramme des températures pendant la congélation. Charbonnage de Helchteren et Zolder. Puits n° II.

glace l'abaissement de température des différents terrains.

Au début, le refroidissement se marque principalement en profondeur, ce qui s'explique vu les températures relativement voisines des températures de surface auxquelles circule la saumure. Mais bientôt, on voit le refroidissement s'accentuer dans certaines zônes : ainsi, en un mois, il y a un abaissement moyen de 7° sur les 100 à 125 premiers mètres, qui s'atténue rapidement pour n'être plus que de 1° à 1°,5 entre 250 et 350 mètres, niveau correspondant à des marnes imperméables. L'abaissement est en moyenne de 3 à 4° dans le crétacé, mais tend à nouveau à décroître dans les marnes et argiles sous-jacentes.

En continuant deux mois le refroidissement, nous remarquons que l'abaissement est de 4° dans les sables supérieurs, 3° dans les argiles sous-jacentes, 5 à 6° dans le second niveau sableux, 4 à 3° dans les argiles sous-jacentes, écart qui se maintient dans le tuffeau, croît légèrement dans les craies compactes inférieures et tend vers des valeurs importantes, 12 à 13° dans les sables herviens.

En continuant le refroidissement, le diagramme des températures tend vers une allure stable dans laquelle nous remarquons : un minimum de température à la profondeur de 50 à 60 mètres dans le premier niveau de sables diestiens, un maximum dans le niveau d'argiles vers 150 mètres, un second minimum dans les sables landeniens à 200 mètres (la température atteignant une valeur qui tend à s'égaler à celle du premier minimum). Un maximum se marque très nettement dans le niveau des marnes et argiles inférieures du tertiaire (niveau contenant des lignites). Un minimum de température assez faible se marque ensuite vers le niveau du tuffeau, mais

en restant de 2 à 4° supérieur à la température des minima précédents et d'un 1/2 degré environ inférieur aux maxima précédents. La température se relève dans les craies aquifères pour s'abaisser ensuite d'une manière régulière vers les températures très basses qui se marquent dans le Hervien.

L'état d'équilibre final auquel aboutit l'allure de ce diagramme peut se résumer ainsi : une température sensiblement uniforme sur toute la hauteur du tertiaire, puis un notable réchauffement au passage du crétacé aquifère ou non et ensuite un abaissement vers la nappe aquifère du Hervien.

De l'examen de ces diagrammes, nous pouvons conclure. Tout d'abord, nous laissons de côté les diagrammes relatifs aux premières semaines de congélation. L'influence des tempéraures croissantes en profondeur s'y fait trop sentir. On peut cependant y déceler déja *un refroidissement moins accentué*, quelque peu atténué *au voisinage du crétacé et spécialement du tuffeau.*

Dès que l'équilibre tend à s'établir, nous voyons se marquer de profondes différences : *les sables sont les plus aptes à subir le refroidissement* et par suite la congélation. Les *roches calcaires du crétacé et spécialement le tuffeau très aquifère et par suite saturé d'eau, présentent un important retard à la congélation* et au refroidissement.

Un diagramme des températures aux parois établi entre 460 et 600 mètres donne une température de — 6°,5 à la base de la nappe aquifère crétacée, — 9° à mi-hauteur de la craie compacte, — 6° à la tête des marnes, température qui s'abaisse rapidement à — 12° dans les sables herviens congelés.

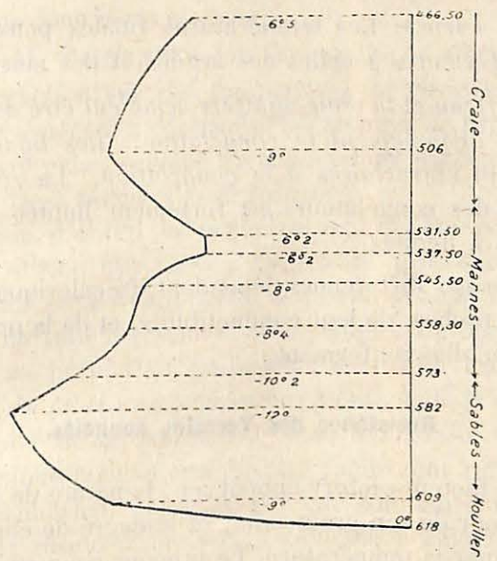


Fig. 2. — Diagramme des températures aux parois. Charbonnage de Helchteren et Zolder. Puits n° II.

On peut tirer de ce diagramme des constatations analogues aux précédents.

D'autres constatations analogues ont pu être faites dans les autres charbonnages de Campine. Partout le crétacé a présenté un retard à la congélation appréciable. Les mesures de température qui ont été faites confirment cette donnée.

Nous pouvons donc conclure qu'à la suite des travaux exécutés en Campine, les déterminations antérieures relatives à la facilité de congélation des terrains ont été confirmées et notablement complétées.

Les sables surtout bien saturés d'eau présentent le plus d'aptitude à la congélation. Les argiles et marnes présentent beaucoup moins d'aptitudes.

Les roches calcaires se refroidissent beaucoup plus lentement, mais paraissent prendre mieux la congélation

que les marnes. Les températures finales peuvent être assez inférieures à celles des argiles et des marnes.

Le tuffeau et la craie aquifère semblent être des roches prenant difficilement la congélation. Les lignites sont fortement réfractaires à la congélation. La zône d'influence des congélateurs est fortement limitée dans les couches à lignites.

Toutes ces différences dépendent du calorique spécifique des roches, de leur conductibilité, et de la proportion d'eau qu'elles renferment.

Résistance des Terrains congelés.

Deux facteurs interviennent ici : la nature de la roche, la grosseur de son grain, etc., et le degré de congélation indiqué par la température. Le premier concerne la pâte, les éléments cimentés et leur adhérence à la glace, l'autre l'état de la glace constituant le ciment.

Un facteur paraît devoir intervenir supplémentairement : la pression à laquelle les terrains congelés doivent résister.

En effet, la masse congelée peut être considérée comme un béton où toutes les particules de roches sont englobées dans la glace. La résistance de chacun des constituants intervient donc et principalement la glace. Or, la nature même de la résistance de la glace, la définition de ses qualités de cohésion n'est point fixée. La glace est-elle réellement un solide rigide, indéformable, ou bien n'est-elle qu'une masse plastique à viscosité très accentuée? Dans ce dernier cas, la pression subie et les conditions dans lesquelles la masse congelée est sollicitée peuvent constituer des faits importants dans l'étude de la résistance du mur congelé.

Examinons donc cette question :

En 1910, M. Zaeringer a fait des essais de compression et de traction sur des éprouvettes de glace ou de roches congelées et il a déterminé les charges de rupture par centimètre cube, suivant les conceptions habituelles.

M. Sauvestre a réalisé l'essai suivant :

Il provoque d'abord la congélation d'un anneau de sable saturé d'eau. Cet anneau est réalisé en tassant ce sable dans une cuve cylindrique, le noyau central étant occupé par un tube légèrement tronconique. La disposition de ce tube permettait également de réaliser un modèle en petit de puits en creusement. Alentour de la cuve on fait circuler de la saumure à basse température. Le tube tronconique pouvait ensuite être facilement retiré : un serpentin intérieur parcouru par une solution chaude provoquait la fusion d'une mince pellicule périphérique de glace.

Il suffisait alors de faire agir sur cet anneau des pressions uniformes et facilement mesurables. A cet effet, la cuve cylindrique contenant le sable congelé, était constituée de la manière suivante : un cylindre extérieur en fer, dans lequel on avait placé concentriquement une virole en plomb peu épaisse à une distance de 5 millimètres. La fermeture de cet espace était réalisée de manière étanche par le rabattement de la virole sur les extrémités du cylindre métallique et son écrasement entre un plateau plein inférieur et un anneau métallique supérieur serrés par boulons. L'espace annulaire était mis en communication avec une pompe à huile qui produisait la pression nécessaire. Celle-ci agissait sur l'anneau de sable congelé par l'intermédiaire de la feuille de plomb.

Les essais réalisés ont donné les résultats suivants :

Sous l'action d'une pression bien définie, le *sable congelé se déforme*. Le phénomène se traduit par une dimi-

nution du rayon du cylindre congelé. La déformation est fonction du temps, elle est d'abord rapide, mais prend peu à peu une allure ralentie et asymptotique. *Au bout d'un certain nombre d'heures, la déformation atteint une valeur pratiquement constante.*

Sous l'action de pression croissante, la déformation croît également. De deux essais faits sur un anneau de sable : le premier, en passant lentement et progressivement de 5 à 10 kilogrammes et en laissant agir cette pression pendant un certain temps, l'autre en agissant directement à la pression de 10 kilogrammes et pendant un temps plus long, la déformation subie dans ce dernier cas est moindre que celle subie dans le premier cas. Les actions antérieures ajoutent leurs effets aux actions actuelles. *On ne remarque aucune élasticité dans ce phénomène de déformation.*

En agissant sur un anneau de hauteur variable, terminé inférieurement par un bloc congelé non évidé et supérieurement soutenu par une enveloppe métallique intérieure, on a pu constater que pour une même déformation, la pression peut s'élever à mesure que la hauteur non soutenue diminue. En forçant la pression, on remarque qu'*à partir d'une certaine valeur, le fond se soulève.* Ce mouvement semble se marquer déjà, mais de manière moins prononcée à des pressions moindres.

On a cherché à obtenir des ruptures d'anneau. La déformation a continué à s'accentuer sans présenter aucune rupture.

A la suite de cette série de constatations, on a pu conclure que dans les conditions de l'expérience, c'est-à-dire dans une enveloppe cylindrique pressée extérieurement, *la glace est plastique.* Des résultats de ces essais, on peut déduire les principales règles de cette déformation. La glace se déforme sans élasticité. La déformation subie est

permanente. *Elle croît avec la pression.* Elle croît également avec *la durée de mise sous pression, mais l'accroissement de la déformation n'est pas proportionnel au temps. Il décroît suivant une loi asymptotique.*

* * *

Examinons maintenant les conditions de résistance des terrains congelés.

Il est évident, dès l'abord, que l'intervention de la roche atténue la plasticité de la glace. Les conditions mêmes de résistance qu'une roche présente d'elle-même (argile, marne, craie), l'intervention des grains plus ou moins grossiers qui sont cimentés dans la glace et qui s'y enchevêtrent, sont des faits qui modifient la résistance des terrains congelés.

Les chiffres admis avant 1910 pour la résistance des terrains congelés étaient les suivants :

Sable saturé d'eau . . .	137 kg./cm² à	— 15°
	200 kg./cm² à	— 25°
Argile sableuse saturée d'eau	90 kg./cm² à	— 15°
Argile saturée d'eau . .	72 kg./cm² à	— 15°
Glace	18 kg./cm² à	— 17°

Des essais faits en 1910 par M. Zaeringer donnaient les résultats suivants :

Argile saturée.	24 kg. à	— 10°
	37 kg. à	— 15°
	50 kg. à	— 20°
Sable fin saturé d'eau . . .	87 kg. à	— 10°
	133 kg. à	— 15°
	141 kg. à	— 20°
Sable fin saturé à moitié . .	52 kg. à	— 10°
	62 kg. à	— 15°
	109 kg. à	— 20°

Mélange en proportion égale .	100 kg. à	— 10°
sable et gravier	109 kg. à	— 15°
	150 kg. à	— 20°

Tous ces chiffres cités sont relatifs à des efforts de compression.

De la simple comparaison des chiffres, il apparaît que :

L'intervention des particules rocheuses accroît notablement la résistance et *cette résistance croît avec la grosseur du grain.* Cet accroissement semble moins net à l'intervention des graviers. Il y a cependant des accroissements entre autres à — 10° et — 20°, accroissements qui s'accentuent avec la proportion de gravier.

La saturation en eau est également un facteur intervenant dans la résistance. En-dessous du degré de saturation, plus la roche est riche en eau, plus elle présente de résistance. En effet, la cimentation des grès est réalisée avec plus d'efficacité.

Un facteur qui intervient également dans la résistance, c'est *le degré de refroidissement.* On observe *un surcroît de résistance de la glace ou de la roche congelée avec l'abaissement de température.*

Des résultats ainsi obtenus, on peut déduire que dans les roches congelées, *les déformations dépendent de différents facteurs* : le *grain de la roche*, la *teneur en eau* de celle-ci, la *température* à laquelle se fait la congélation, la *hauteur de terrain exposée à la pression*, la *durée de cette mise en compression.*

Comment se comporte un cylindre de glace aux très hautes pressions?

A ce point de vue, on peut tirer quelques renseignements intéressants, des essais entrepris par M. Sauvestre sur les conditions de résistance des sables congelés soumis à haute pression. A mesure que les pressions croissent, il est nécessaire de créer autour du puits, un mur suffisamment épais, d'abaisser notablement la température de congélation, de réaliser un placement immédiat du revêtement et d'opérer par passe excessivement réduite. Nous allons résumer, rapidement, l'essentiel de ces conclusions et les expériences qui les justifient.

En ce qui concerne l'*épaisseur du mur*, cette notion se justifie immédiatement. Ce qui est primordial au cours du creusement, c'est que la déformation subie par les parois du *trou* creusé soit minime, ne dépasse pas une limite imposée.

Cette limite dépend évidemment de l'épaisseur. La simple formule de résistance

$$P\,(D + 2e) = 2e\,R$$

justifie cette idée, si l'on admet que R représente la tension tangentielle qui détermine les fortes déformations.

Si *la hauteur découverte* est grande, moindre doit être la pression supportée. Ce fait s'explique comme l'influence de la hauteur des éprouvettes et du frottement des plateaux dans les essais de compression simple.

D'après les essais effectués en réduisant la hauteur découverte de $13^m,70$ à $3^m,45$, puis à $0^m,936$, on voit la pression-limite, c'est-à-dire la pression à partir de laquelle les déformations sont trop sensibles, passer de 10 kilogrammes à 20, puis à 45 kilogrammes. Cependant, à ce point de vue, on remarque qu'il est une limite à partir de laquelle il est inutile de pousser la réduction de hauteur afin d'accroître la pression : le fond se soulève.

Ceci s'explique assez aisément : si la surface latérale est maintenue et ne peut se rétrécir, comme la pression agit sur toute la hauteur du puits, creusée ou non, elle peut dans celle-ci provoquer un écrasement du noyau central qui fluera alors vers la seule sortie libre, en l'occurence le fond dégagé au creusement.

La limite de pression sera donc celle qui correspond au début du soulèvement du fond. La hauteur de creusement maximum sera celle correspondant à cette limite. Nous voyons donc, à la suite de ces déductions, que si une limite de pression est imposée, c'est par le danger de soulèvement du fond.

L'*influence du temps* est importante pour la détermination de la marche à suivre quant à la pose du revêtement. Nous avons vu que par suite de la plasticité, la déformation de la paroi du puits s'accentue avec le temps, mais tend vers une limite, vers une valeur extrême.

Il y a donc intérêt, au cas où celle limite est assez grande et où la déformation est assez rapide, de ne point laisser trop longtemps la paroi sans soutènement définitif. Ceci sera le cas lorsque les conditions de sollicitation seront voisines des conditions extrêmes que l'on s'impose.

Le principal facteur qui intervient dans la détermination des pressions-limites, c'est la *température extrême de congélation.*

Ainsi, au cours de ses essais, M. Sauvestre a été amené à constater que la même déformation résultait de pression à 40, 60, 80 ou 100 kilogrammes suivant que la température de congélation était — 10°, — 20°, — 25° ou — 35°. On peut donc dire qu'en moyenne, chaque degré d'abaissement de température permet un accroissement de pression de 2 kilogrammes. En réalité, il semble s'indiquer une certaine variation dans la loi qui relie l'accroissement de pression et l'abaissement de température. Entre — 10° et — 20°, — 25° et — 35°, la relation est de 2 kilogrammes par degré, mais entre — 20° et — 25°, elle atteint 4 kilogrammes par degré. L'insuffisance de documents ne nous permet pas de donner plus de précision à une loi que nous entrevoyons et qui semble devoir *limiter l'intérêt de l'abaissement de température*

de congélation. La résistance supplémentaire par degré de refroidissement aurait un maximum à — 25°, puis décroîtrait au-delà.

Au cours de ses essais, M. Sauvestre a été amené à préciser quelques faits relativement à la résistance spécifique des terrains congelés.

Dans les mêmes conditions, la glace présente une résistance-limite de beaucoup inférieure à celle du sable congelé. C'était connu depuis longtemps.

En comparant les courbes de déformations relatives à des essais sur des sables argileux de teneurs différentes, il a pu remarquer que les déformations de deux échantillons étaient sensiblement égales pour certaine pression. En-dessous de cette valeur, les déformations du sable fortement argileux sont moindres que celles du sable peu argileux. Au-delà, c'est l'inverse.

Cette constatation implique une loi différente entre les déformations et les pressions subies suivant la teneur en argile du sable. Aux faibles pressions, l'argile aurait un effet favorable qui tient vraisemblablement de la texture plus fine qu'elle donne à la masse. Mais ce bénéfice ne se marque plus au-delà d'une certaine pression. A partir de cette valeur, la finesse du grain de l'argile réduit la résistance et facilite la plasticité.

Ceci n'est encore une fois qu'une indication. Le nombre de documents sur lesquels on puisse actuellement se baser étant insuffisant pour établir une règle scientifique.

* * *

La congélation agit principalement, dans les *roches calcaires*, sur l'eau qui circule dans les fissures. La roche par elle-même est imperméable. L'eau y circule et crée des nappes grâce aux joints élargis, aux fractures, aux

sillons de dissolution. Par elle-même, la roche présente une certaine cohérence et une certaine résistance.

Quant au *tuffeau*, la congélation entreprise a donné d'excellents résultats. Les chiffres empiriques utilisés pour déterminer l'épaisseur du mur de glace dans les niveaux supérieurs ont été suffisants. On n'a eu aucun mécompte. L'étude scientifiqaue de la congélation de ces terrains n'a pas été entreprise.

* * *

En résumé, nous voyons que les travaux entrepris en Campine et principalement les essais entrepris par M. Sauvestre à Beeringen, ont permis de vérifier et de contrôler certaines constantes utilisées dans la détermination des masses à congeler, ont élucider la question de plasticité de la glace et mis en évidence l'importance de certains facteurs : temps, température, hauteur découverte, etc.

Pour établir une théorie de la résistance des terrains congelés, les données sont en trop petit nombre. Il y aurait lieu d'organiser une série de nouvelles expériences sur l'influence des grains de la roche et la composition de celle-ci, sur la question importante pour l'avenir du procédé dans des fonçages à très grande profondeur, des variations de résistance avec l'abaissement de température.

On devrait opérer à des pressions encore plus considérables que les 70 kilogrammes atteints jusqu'à présent sur des modèles réduits, dans un ordre de grandeur analogue à celui réalisé par M. Sauvestre. Ces expériences de longue haleine exigeraient des laboratoires spécialement équipés.

* * *

Mouvements de Terrains résultant de la Congélation.

La question des mouvements de terrains est importante pour la sécurité du personnel, la résistance des soutènements provisoires, l'organisation du travail de fonçage et la conservation de l'installation congélatrice.

En effet, sous l'action des pressions des nappes aquifères et sous l'action même des forces de compression qui naissent dans les masses rocheuses, à la suite de la congélation, les terrains ont tendance à fluer vers le centre du puits creusé, ou à provoquer des soulèvements du fond de l'avaleresse.

Une partie de ces phénomènes a été étudiée dans le paragraphe précédent. D'autre mouvements peuvent résulter du gonflement des masses congelées qui, agissant sur des couches plus plastiques, les font fluer.

Si le premier cas (mouvements résultant des pressions de nappe) se manifeste dans toutes les roches et atteint une importance grave dès que la résistance du mur de glace est insuffisante, le second cas (mouvements résultant du gonflement des terrains congelés) se manifeste principalement dans les terrains plastiques imperméables tels que marnes, argiles. Les intercalations de lignites constituent également des masses plastiques sujettes à des glissements importants de lits entre toit et mur. Il se manifeste également des soulèvements de fond dans le cas de la progression du creusement et également lors des reprises de congélation en profondeur.

Ainsi, aux Charbonnages André-Dumont et de Beeringen eut-on à souligner d'importants soulèvements de fond au cours des reprises de congélation.

Ces phénomènes ont une grande importance, car, sous leur action, les tubes congélateurs peuvent être cisaillés ou étirés, ou placés dans des conditions de sollicitation

tellement spéciale qu'il en résulte des ruptures. Nous pouvons en citer des exemples à Beeringen.

De plus, au point de vue soutènement provisoire, celui-ci peut avoir à résister à des efforts exagérés qui entraînent des ruptures de pièces, des chutes d'armatures, des calages de cadres si accentués que tout démontage soit rendu impossible. Des exemples frappants ont été mentionnés dans la plupart des charbonnages de Campine à la traversée des argiles et marnes de Gelinden et des argiles à lignites.

Il y a donc nécessité d'empêcher tout glissement de terrain, tout rétrécissement du diamètre du puits, puisqu'en rien, nous ne pouvons influer sur la cause de ces mouvements. Pour cela, le procédé le plus pratique et le plus sûr est de creuser par passes réduites de la hauteur d'un anneau, de poser le cuvelage directement en descendant et de cimenter immédiatement l'espace annulaire intermédiaire entre le terrain et le cuvelage. Ainsi a-t-on réduit la hauteur découverte et, par suite, l'intensité, l'importance et la rapidité du mouvement des terrains et limité le temps d'exposition sans soutènement. Le déplacement de terrain a été faible et pratiquement nul. Le cuvelage immédiatement mis sous tension a résisté à tout autre mouvement.

En ce qui concerne les soulèvements du fond, spécialement en cas de reprise de congélation, le danger consiste dans l'étirement qu'il provoque sur les tubes congélateurs. On évite le mouvement de bas en haut en forant dans le fond, sur la hauteur de la passe à congeler, une série de sondages à assez grand diamètre, également répartis sur un ou des cercles concentriques. Lors du flux de matière par progression du mur de glace, ces trous se resserrent d'abord avant que ne se produise un soulèvement du fond. En même temps, on facilite l'expulsion

des eaux non congelées au centre du puits par un sondage captant ce qui réduit encore l'importance du flux de terrain.

Afin de parer aux mouvements de terrains horizontaux qui peuvent cisailler ou briser les tubes congélateurs, on munit ceux-ci de colonnes de secours.

* * *

2. — RÉALISATION DE LA CONGELATION.

Nous avons vu par l'étude précédente qu'il était possible, connaissant les conditions de pression que la paroi congelée avait à supporter et les conditions de fonçage dans lesquelles on opérait : diamètre de creusement, hauteur des passes, pose du cuvelage, etc., de déterminer l'épaisseur du mur de glace et la température à laquelle la congélation devait être réalisée. Ce sont là les deux points principaux.

Réalisation d'un mur de glace.

Le mur de glace est réalisé par la congélation des terrains, grâce à la circulation à l'intérieur de tubes descendus jusqu'à la profondeur voulue d'un liquide à très basse température. Il se produit ainsi dans le sol, autour des tubes, un échange de chaleur : la chaleur des terrains réchauffant le liquide circulateur, mais celui-ci refroidissant les terrains. Le liquide étant constamment renouvelé, absorbe la chaleur des terrains et les amène à une température un peu supérieure à la sienne. La température des terrains varie évidemment à mesure que l'on s'écarte du tube réfrigérant. Dès qu'elle est inférieure à 0°, il se produit une congélation. Il y a ainsi autour de chaque tube un manchon épais de terrain congelé dont la température croît du centre à la périphérie. Le diamè-

tre de cet anneau varie évidemment suivant l'aptitude des terrains au refroidissement (ils sont diversement conducteurs) et suivant l'amplitude de ce refroidissement. Il est évident que l'échange de chaleur et de froid décroît à mesure que l'épaisseur du manchon croît. La glace est un bon calorifuge.

La partie principalement utile pour la résistance est la partie centrale où la température est voisine de la température à laquelle la résistance du mur de glace est envisagée.

On choisit comme diamètre minimum d'action d'un tube réfrigérant 2 mètres. A Beeringen, lors de la reprise de congélation, ce diamètre a été élevé à 3 mètres. La température de circulation du liquide congélateur était fortement abaissée.

Ces valeurs sont choisies empiriquement. Elles ont donné complète satisfaction.

Se basant sur ces valeurs, il suffit de forer sur la périphérie du puits à creuser une série de sondages suffisamment espacés pour permettre un forage et un équipement aisé et suffisamment proches pour provoquer l'intersection des cylindres d'influence cryologique. S'il y a lieu, ces sondages seront placés sur une ou plusieurs circonférences concentriques. Dès que les manchons de glace se rejoignent, l'accroissement d'épaisseur du mur est plus rapide.

En Campine, les sondages furent placés sur un ou deux cercles. Dans ce cas, ils étaient disposés en quinconce. Lors des reprises de congélation à *Beeringen* et à *Waterchei*, les sondages furent placés sur trois ou quatre circonférences concentriques.

Une question importante est celle du diamètre de ces cercles. Les sondages doivent être forés de manière à rester constamment en dehors du cercle de creusement

du puits et à une distance suffisante pour maintenir l'épaisseur du mur et rester à l'abri des ébranlements trop violents lors du tir des mines. Le diamètre ne doit pas être exagéré non plus, car dans ce cas, à épaisseur égale, le mur de glace est moins résistant et le creusement pourrait exiger la pose d'un soutènement provisoire continu. De plus, les terrains manquent de consistance pour l'établissement des trousses et le montage du cuvelage. Il importe donc que le creusement morde dans le mur de glace. Ainsi, les parois se soutiennent d'elles-mêmes, les banquettes d'assises sont fermes et l'on peut ausculter le mur de glace. Il y a toutefois intérêt au début à creuser sans attendre la solidification de l'intérieur du puits.

En général, lors des fonçages de Campine, les diamètres des circonférences suivant lesquels on fora les sondages furent supérieurs de 3 à 5 mètres au diamètre extérieur de creusement.

Ainsi à :		
Beeringen . . .	7,50	10,80
Winterslag . . .	7,00	11,00
Limbourg-Meuse .	7,50	12,25
Zolder	8,00	12,50

Mais il est essentiel que le mur ainsi créé par le contact des cylindres d'influence des différents sondages soit continu sur la périphérie et sur toute la hauteur et soit suffisamment résistant. La continuité du mur et le contrôle de son épaisseur peuvent être établis par l'examen détaillé des diagrammes tracés à différents niveaux et représentant les coupes horizontales des sondages et, par des cercles concentriques, le noyau congelé qui les entoure. Si ces noyaux se recoupent sur des épaisseurs suffisantes et ne laissent aucune lacune sur le pourtour à aucun niveau, on peut dire que, théoriquement, le mur de glace sera continu, fermé et étanche.

Ceci implique évidemment une connaissance précise et exacte de la position du trou de sonde aux différents niveaux, c'est-à-dire la mesure continue et exacte des déviations. Divers appareils ont été utilisés dont nous avons pu comparer les résultats. Cette étude sera faite dans un des chapitres suivants.

Au cas où le mur présente des brèches par suite de trop grandes déviations des sondages, on sera obligé de forer en ces endroits des sondages supplémentaires. Ceux-ci seront évidemment creusés avec soin, de manière à leur assurer une verticalité presque parfaite. Les contrôles de déviation se feront fréquemment au cours du creusement, de manière à pouvoir remédier immédiatement à toute déviation importante. Il sera de même foré des sondages supplémentaires aux points où le mur de glace paraîtra insuffisant.

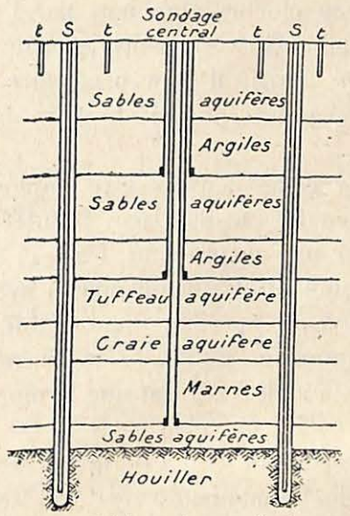
* * *

Un point important également est de pouvoir contrôler expérimentalement la valeur de la résistance du mur de glace ou, à défaut, sa fermeture.

A cet effet, on creuse au centre du puits un sondage recoupant les diverses assises. Ce sondage doit permettre de déterminer la fermeture et, s'il y a lieu, la résistance du mur de glace aux niveaux particulièrement importants, c'est-à-dire au niveau des passes aquifères.

Ce *sondage central*, tel qu'il a été installé aux différents puits de Campine, est équipé avec une série de tubes isolants, étanches, concentriques, s'arrêtant aux différentes nappes aquifères et soigneusement frettés au ciment à la tête de chacune de celles-ci, afin d'assurer une complète indépendance des différents espaces annulaires.

L'indice de la fermeture du mur de glace est très facilement obtenu. On se base sur le fait que le mur de glace



S : *Sondage de congélation*
t : *Sondage pour mesures thermométriques*

Fig. 3. — Coupe schématique d'un sondage central. Charbonnage de Helchteren et Zolder.

NOTE. — On remarque sur les 50 mètres supérieurs l'existence de petits sondages. Ceux-ci sont au nombre de huit. Quatre intérieurs et quatre extérieurs au cercle des sondages de congélation. Ces sondages permettent la descente de thermomètres bombés qui donnent par une série de lectures un diagramme précis du refroidissement des terrains et de la marche de la congélation. Ce procédé ne peut malheureusement être réalisé que superficiellement. Son coût en empêche l'utilisation sur toute la hauteur du puits. C'est pourtant le seul procédé précis et efficace pour suivre la marche de la congélation.

étant fermé dans un des niveaux aquifères, l'eau qui se trouve au centre de l'anneau est comprimée lors de la progression du mur de glace. La nappe aquifère étant comprise entre des bancs de roche imperméable, la pression de l'eau croîtra ou, s'il y a orifice, l'eau jaillira par celui-ci, de manière à décongestionner les terrains. La fermeture du mur de glace sera donc indiquée, soit par le débordement des tubes et espaces annulaires en relation avec les nappes, soit, si ceux-ci sont obturés par

des couvercles ou cloches étanches, par l'augmentation de la pression indiquée. Ce dernier procédé a été spécialement employé lorsqu'il était nécessaire de connaître l'instant de la fermeture du mur de glace dans un niveau seulement.

Les mêmes procédés peuvent être employés pour évaluer la résistance du mur de glace. Il sufffit que celui-ci puisse supporter une surpression. Celle-ci est provoquée en haussant le tube au-dessus du niveau hydrostatique de la nappe. Le niveau supérieur étant établi de manière à réaliser la surpression voulue, si ce niveau ne s'abaisse pas ou continue à s'élever, c'est que le mur est suffisamment résistant.

Un autre procédé consiste à obturer l'orifice d'un sondage par une cloche manométrique. Par suite de la progression du mur de place, la pression de l'eau croît et les valeurs qu'elle atteint marquent la résistance du mur.

Un point délicat, dans la détermination des fermetures de mur de glace dans différents niveaux, provient de la différence de temps que ces murs présentent quant à leur formation. Il peut en résulter que l'eau se congèle dans le sondage au niveau d'une des nappes supérieures, alors que le mur n'est pas encore fermé dans les nappes inférieures. De ce fait, il est impossible de recueillir d'indices relativement à ces dernières.

Dans certains puits, on a empêché cette congélation intempestive en créant dans un espace annulaire une circulation de saumure chaude destinée à retarder et empêcher la prise en masse de l'eau du sondage.

Celui-ci est démonté au fur et à mesure du creusement afin d'éviter un trop grand encombrement du puits. Il paraît cependant intéressant de le maintenir, afin de pouvoir continuer les observations sur l'état du mur dans les nappes inférieures au niveau de creusement. On peut

avoir ainsi aussi quelques indices et réaliser des mesures en cas de rupture du mur de glace.

Le sondage central permet également de suivre, par des lectures thermométriques, les variations de température aux différents niveaux. On utilise, à cet effet, le thermomètre bombé descendu dans le tube jusqu'à la profondeur voulue.

A Beeringen, l'équipement du sondage central comporta deux tubes : le tube intérieur descendait dans le crétacé, le tube extérieur aboutissait à la base du tertiaire. Après avoir établi une frette étanche en ciment à sa base, de manière à supprimer toute communication avec les nappes crétacées, on a fendu le tube extérieur suivant des génératrices à hauteur des nappes aquifères tertiaires. Toutes ces nappes alimentaient donc le sondage et l'indication obtenue concernait la fermeture du mur sur toute la hauteur du tertiaire.

Ce procédé, plus économique parce qu'il réduit le nombre de tubes à descendre et, par suite, le diamètre du sondage à creuser, est assez pratique dans le cas de nombreuses nappes assez rapprochées, mais il prête à plus d'incertitude. En cas de non fermeture, on ignore quel est le niveau où le mur n'est pas continu et, par contre, il peut se produire des débordements de l'espace annulaire, alors que le mur n'est fermé qu'en certains niveaux.

Réalisation des basses températures

Nous avons souligné dans l'étude théorique de la congélation des terrains, l'importance, au point de vue de la résistance des anneaux congelés, du facteur température.

Nous abordons ici l'examen de la réalisation de la congélation et surtout de l'abaissement de température. La

congélation résulte de la circulation dans les tubes d'un liquide à très basse température. On emploie des solutions chlorurées de Na Cl, Mg Cl2 ou Ca Cl2.

La teneur en sel est un facteur essentiel de l'abaissement du point de congélation. Il est nécessaire d'éviter toute précipitation du sel soit dans les chambres de refroidissement, soit dans les tubes et de maintenir la solution à un titre de salure constant et bien établi. Il est nécessaire également, en ce qui concerne la conservation des appareils, conduites et tubes, que cette solution ne soit pas trop concentrée, sinon la corrosion s'exerce avec plus d'intensité. On a utilisé en Campine principalement le chlorure calcique.

Des températures très basses ont pu être réalisées avec succès par des circulations de solution alcoolique de Ca Cl2. Cette solution était constamment vérifiée et maintenue au même titre en Ca Cl2 et alcool. La basse température est produite par la détente et la brusque évaporation avec refroidissement intense d'ammoniaque ou d'anhydride carbonique.

L'ammoniaque est fréquemment utilisé parce que plus maniable et plus aisément liquéfiable que l'anhydride carbonique. Mais celui-ci permet d'atteindre des températures plus basses. Par contre, les compresseurs doivent être plus puissants. Il est nécessaire de comprimer à des pressions atteignant 70 atmosphères. Mais l'effet utile en frigories de ces installations est plus grand et plus appréciable spécialement pour les basses températures.

L'échange de froid se fait dans une cuve où le gaz détendu et refroidi circule dans un serpentin noyé dans la saumure ou la solution alcoolique. A titre d'exemple, nous décrivons en annexe deux installations frigorifiques employées en Campine.

A Zwartberg, on utilisa des compresseurs à anhydride carbonique. Dans les autres charbonnages, l'utilisation de l'ammoniaque prévalut.

L'installation comporte schématiquement :

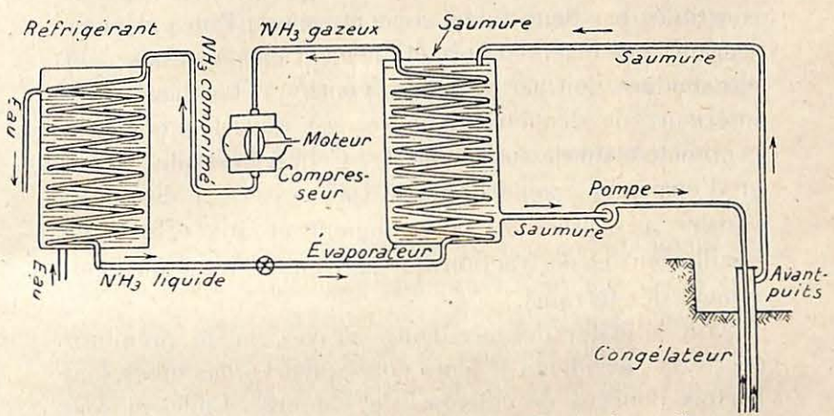


Fig. 4. — Schéma théorique d'une installation de circuit congélateur.

Plusieurs groupes de compresseurs actionnés par machine à vapeur ou moteur électrique où le gaz à basse pression est aspiré. Après compression, le gaz est envoyé dans un serpentin sur lequel on provoque une cascade d'eau froide. Il sort de ce condenseur liquide, à haute pression et basse température. Il est détendu alors dans un ajutage à orifice étroit débouchant dans une enceinte où le compresseur maintient une basse pression. Par suite de la détente et de la vaporisation, la température s'abaisse considérablement. L'ammoniaque ou l'anhydride carbonique ainsi refroidi circule dans un serpentin baigné dans la saumure maintenue constamment en circulation et lui communique sa basse température.

Le liquide réfrigérant ainsi refroidi circule alors dans toute l'installation : un conduit soigneusement calorifugé

met en relation la cuve à saumure avec un collecteur où viennent se brancher les tubes congélateurs. Ce collecteur est double : une moitié sert à l'amenée et l'autre au retour du liquide congélateur.

Les tubes utilisés en Campine pour la congélation sont constitués par deux tubes concentriques : l'un extérieur à grand diamètre, est hermétiquement clos à sa base soit par soudure, soit par un fond rapporté et étanche, l'autre intérieur, de diamètre moindre, est ouvert à quelques centimètres au-dessus du fond. Celui-ci est plus étroit et d'épaisseur moindre que le tube extérieur destiné à résister aux pressions d'écrasement et aux efforts de cisaillement et de traction qui peuvent résulter du mouvement des terrains.

Afin d'éviter des accidents graves ou de prémunir contre ces accidents et leurs conséquences, les tubes sont parfois pourvus de colonnes de secours. Celles-ci sont parfois descendues quand un accident s'est produit, mais l'opération est plus délicate et parfois les conséquences graves de l'accident ont pu se manifester. Aussi, quand, par expérience, ou sur d'autres indices, on peut escompter avec quasi certitude d'importants mouvements de terrains, il est utile et pratique de munir dès le début les tubes congélateurs de colonnes de secours. Celles-ci peuvent être aisément retirées lors de la congélation. Ainsi a-t-on fait à Waterschei.

Parfois les trous de sonde sont tubés au fur et à mesure du forage pour éviter les calages de trépan, couronnes, etc. et des éboulements. On descend alors les tubes congélateurs dans le tubage qui est ensuite retiré, de manière à mettre directement les tubes en contact avec le terrain. Le tubage, en effet, est néfaste à la congélation par l'obstacle qu'il crée à la transmission du froid et les accidents qu'il peut provoquer.

Au point de vue de la gravité d'une rupture de tube congélateur et aussi de l'expansion du liquide incongelable dans le sol environnant, il a été remarqué, au cours du fonçage à Beeringen, qu'un tube s'étant localement déchiré dans une passe congelée à très basse température, la paroi de glace n'a pas fondu et est restée intacte. Les très basses températures de congélation paraissent donc favorables pour réduire l'importance des accidents.

Précautions à prendre dans le montage de l'installation.

Dans le montage des différents organes, de nombreuses précautions doivent être prises tant en ce qui concerne le maintien de la température à sa valeur minimum que pour éviter toute perte de saumure. De plus, il faut veiller à ce que la saumure produise le meilleur effet utile, quant à la congélation des terrains.

Nous avons déjà indiqué qu'afin d'éviter tout réchauffement de la saumure, les conduites jusqu'au collecteur étaient soigneusement calorifugées. On employa d'ordinaire un revêtement en liége. Cependant, on a préféré, dans certains cas, laisser les conduits se couvrir de glace par condensation de l'humidité. Cette glace jouant ainsi le rôle de calorifuge. Ce procédé est défectueux : il provoque d'abord une certaine perte de frigories que le calorifugeage empêche, frigories qui ont été produites à la centrale par consommation d'énergie ; ensuite, au point de vue sécurité, il est peu recommandable pour deux raisons : le danger de chute de bloc de givre mal adhérent aux conduites, l'attaque de la glace sur les conduites.

Au point de vue réchauffement, il faut également veiller à réduire les frottements de la saumure dans les tubes et les obstructions, donc réaliser le placement et le rac-

cord des conduites avec un minimum de coudes à grand rayon et placer la cuve de saumure le plus près possible de l'avant-puits afin de réduire le parcours, éviter dans les raccords de tube et de conduite des surépaisseurs tels que manchons, recouvrements, etc. Les conduites sont réunies par collets extérieurs avec joints en plomb ou étoupes étanches, les tubes sont ou soudés ou raccordés avec manchons filetés extérieurs ou par vissage. Les extrémités filetées mâles ou femelles se raccordant de manière à supprimer toute saillie. Les autres procédés de raccord se sont montrés défectueux quant à l'absorption de frigories et aux perturbations de circuit.

Quant aux pertes de saumure, aux fuites, la réduction du parcours en conduite, le soin apporté aux joints et à leur étanchéité, le placement de raccords parfaits sont tous détails ayant une importance propre. Ce qui est important à ce point de vue, c'est la question des contractions au refroidissement. L'abaissement de température entre le placement des conduites et la marche en régime de circulation de saumure atteint plus de 30°. Il en résulte des contractions importantes qui, absorbées seulement par l'élasticité du métal, donneraient des tensions exagérées, d'où rupture de tube et arrachement de joints. On doit donc veiller à placer sur les conduites des joints de contraction qui compensent cette réduction de longueur sans provoquer de fuite. On a également employé le dispositif suivant qui a donné d'excellents résultats. De loin en loin, on place des dynamomètres destinés à indiquer toute tension supplémentaire. Dès que certaines tensions sont dépassées, on desserre les attaches des conduites et colonnes, de manière à permettre le libre glissement. Le raccord est alors établi par un joint flexible dont le jeu compense la contraction.

Ce système donne une étanchéité parfaite : tous les

joints ayant été essayés avant la mise en marche à de fortes pressions et, lors du refroidissement, se trouvant dans le même état que lors des essais. Cependant, ce procédé est plus délicat et exige plus de surveillance.

Une excellente mesure de précaution consiste à vérifier tous les organes, tous les joints et raccords séparément ou par groupe à des pressions élevées. C'est un gage de sécurité. Le soin apporté à la réalisation des joints et raccords et à leur étanchéité est réclamé également dans l'installation des compresseurs et des appareils de circulation de l'ammoniaque et de l'anhydride carbonique. Les moindres fuites se traduisent ici également en perte de frigories.

Les essais doivent être plus poussés et faits avec une extrême sévérité pour l'anhydride carbonique en raison des pressions supérieures que ce système réalise et du manque d'indice de fuites légères sur lequel on doit compter. Dans le cas de l'ammoniaque, la fuite la plus minime est immédiatement décelée par l'odeur.

On doit également tenir compte dans le montage de la nécessité où l'on peut se trouver de mettre hors circuit une partie des sondages ou de changer une partie de l'installation spécialement dans le raccordement aux compresseurs. Ces opérations doivent pouvoir se réaliser immédiatement et rapidement. Immédiatement, afin de limiter au minimum les conséquences d'un accident tel que rupture de tubes; rapidement, afin d'éviter des conséquences graves telles qu'un début de décongélation par arrêt d'une partie de la centrale frigorifique.

Ainsi, à la suite des travaux de Campine, est-on amené à conclure à l'utilité de munir chaque sondage d'organes de fermeture qui l'isolent du congélateur, de munir les conduits d'amenée et de retour de la saumure de clapets et vannes, permettant un arrêt de circulation (ce

dernier organe peut être supprimé dans le cas où chaque sondage possède des organes de fermeture propres, sauf cependant certains cas, tels par exemple une reprise de congélation), d'étudier avec soin les dispositifs de robinetterie de manière à réaliser toutes les permutations possibles des divers organes entre eux.

* * *

En ce qui concerne le meilleur effet utile à obtenir de la congélation, il apparaît de suite que chacun des points exposés ci-dessus y contribue. De plus, on saisit immédiatement quelle importance il y a à réaliser une installation de grande souplesse où l'on soit maître de régler rapidement l'intensité de la congélation, la puissance en frigories nécessaires et la température à obtenir suivant les nécessités prévues et pour faire face à toutes les éventualités.

L'installation de la centrale frigorifique sera donc réalisée largement avec présence d'appareils de secours. Les connections seront disposées de manière à faciliter la mise hors service ou la rentrée d'unités, les machines seront elles-mêmes aptes à suivre toutes les variations réclamées. Des tuyauteries à large section laisseront toute aisance en ce qui concerne le réglage du débit et la répartition de la température. La permutation des différents organes sera facile et rapide.

Les installations de contrôles thermométriques, manométriques et autres seront multipliées et constamment en ordre de marche, de manière à obtenir continuellement un ensemble de données qui permettent de suivre la marche de la machine.

Il en sera de même pour l'utilisation du sondage central et les mesures à y effectuer, de manière à obtenir des documents sur les résultats au cours même de l'exécution. Il sera loisible aussi à tout instant de prévoir les modifications à apporter, de manière à maintenir le rendement à son maximum économique. Quelques points de détail peuvent être encore soulignés. Entre autres, la disposition des tubes congélateurs : le tube d'amenée de la saumure est intérieur et à petit diamètre, l'espace entre les tubes intérieur et extérieur, dont la section est plus grande que celle du tube intérieur, sert à retour de la saumure. Il en résulte une différence de vitesse : rapide à l'arrivée de la saumure fraîche, lente à la remontée, ce qui permet un contact prolongé avec les terrains à congeler.

Le tube d'amenée est intérieur, ce qui a pour conséquence de réduire l'écart de température entre la base et le sommet du tube congélateur et de créer ainsi une uniformité de température et de congélation sur toute sa hauteur. Ceci a pour conséquence d'uniformiser l'action des terrains se congelant sur les tubes. Des pressions et des sollicitations imprévues et exagérées peuvent naître d'une congélation irrégulière. Un exemple très net a été observable à Beeringen lors de la descente de tubes congélateurs dans des sondages forés dans le terrain congelé. L'uniformisation de la température sur toute la hauteur du sondage est le seul moyen efficace de prévenir ces poussées irrégulières résultant de la prise plus rapide de certains niveaux sableux et du gonflement des intercalations argileuses. En même temps, la prise trop rapide des terrains en certains points empêche la libre contraction du congélateur et, par suite, fait naître des tensions exagérées.

A ce point de vue encore, il est à remarquer que, lors de la mise en marche de la congélation, la circulation doit être établie d'abord avec une saumure chaude (à température voisine de celle des roches), et ensuite avec

une saumure progressivement refroidie. On est ainsi maître de la congélation et on la régularise au moins dans la périphérie des tubes congélateurs.

Nous ne donnerons ici que quelques points de détail. Nous décrirons deux des installations de centrale frigorifique réalisées en Campine.

INSTALLATIONS REALISEES PAR LA SOCIETE FORAKY.

Les centrales frigorifiques comprennent 4 à 6 groupes frigorifiques.

Chaque groupe comporte un compresseur double actionné par moteur électrique. Ce compresseur aspire l'ammoniaque dans quatre cuves réfrigérantes accouplées sur deux pompes à saumure. Après compression, chaque compresseur refoule l'ammoniaque dans un collecteur général sur lequel se branche les serpentins de condensation. L'ammoniaque est ensuite distribué aux différents groupes de cuves réfrigérantes.

A titre d'exemple, nous donnons ci-contre le croquis d'une de ces installations. Parfois, les serpentins de condensation sont placés au-delà des condenseurs. Ils sont établis dans un local séparé.

Nous donnons également à titre documentaire, quelques chiffres relatif à une installation de ce genre :

Charbonnage de Limbourg-Meuse.

Nombre de groupes : 6 ;

Puissance frigorifique : 300.000 frig. à — 20° par groupe.

Les compresseurs sont actionnés par moteurs électriques (un par groupe). Puissance : 300 HP. sous 5.000 volts.

Cuves réfrigérantes : 4 par groupe.

Surface de serpentin réfrigérant : par cuve, 113 m².

Surface totale du condenseur : 4.200 m².

Celui-ci est à ruissellement d'eau.

Débit en eau : 1.440 m³ à l'heure.

Nombre de pompes à eau : 6.

Nombre de pompes à saumure : 6.

Débit total : 660 m³ à 9 atmosphères.

Toutes ces pompes sont actionnées à l'électricité.

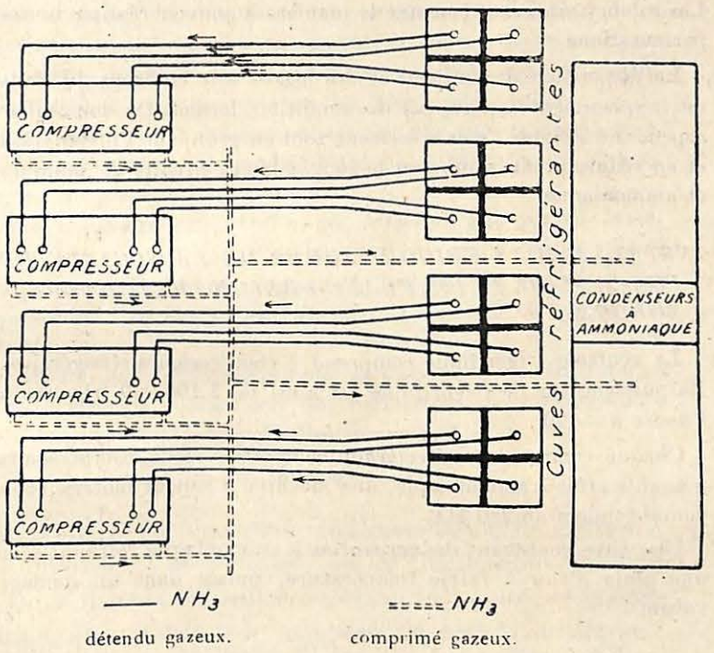


Fig. 5. — Installation de Centrale frigorifique. Aspiration et refoulement de NH3. (Société Foraky.)

Quelques précautions et mesures de contrôle sont observées pour la surveillance, la régularisation et l'entretien de l'installation.

A ce titre, un contrôle thermométrique et manométrique ainsi que débitmétrique est constamment exercé sur les trois circuits Ammoniaque, Saumure, Eau. A cet effet, des thermomètres et manomètres sont placés à l'entrée et à la sortie des principaux organes, des jaugeurs et compteurs permettent de contrôler la régularité de la circulation et de vérifier l'état des circuits (fuites, obstruction, etc.).

La prise fréquente de diagrammes de compression permet de contrôler la marche de ces appareils.

Les tuyauteries sont à large section et doivent, par leur disposition et leurs organes, permettre un débit réglable de la saumure.

Les robinetteries sont conçues de manière à pouvoir réaliser toutes permutations.

La disposition des organes et des locaux aux environs du puits est fréquemment imposée par des conditions locales. On doit veiller cependant à éviter l'encombrement tout en groupant l'installation et en réduisant au minimum la longueur des circuits de saumure et ammoniaque.

INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES DE LA SOCIETE DE FONÇAGE DE PUITS FRANCO-BELGE (HELCHTEREN-ZOLDER).

La centrale frigorifique comprend 7 compresseurs-réfrigérants. La puissance totale frigorifique est ainsi de 2.100.000 frigories à l'heure à — 20°.

Chaque compresseur-réfrigérant comporte : deux compresseurs à double effet à ammoniaque, une machine à vapeur motrice compound-tandem de 250 HP.

Une cuve contenant des serpentins à ammoniaque refroidit sous une pluie d'eau à faible température, puisée dans un sondage voisin.

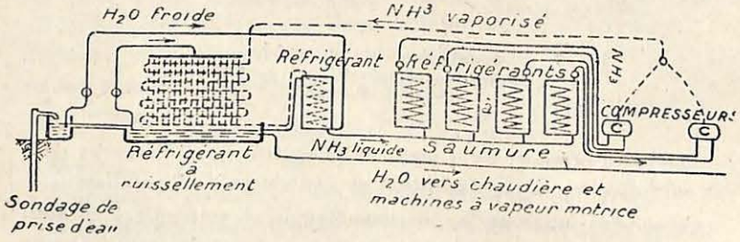


Fig. 6. — Schéma de l'installation d'un groupe frigorifique. Charbonnage de Helchteren et Zolder (Société Franco-Belge de Fonçage.)

Une seconde cuve refroidisseuse accentuant l'abaissement de température et parfaisant la liquéfaction de l'ammoniaque. Ceci remédie, en effet, au fait que l'eau fraîche tombe d'abord dans le premier refrigérant sur les tubes parcourus par l'ammoniaque à température élevée. Le refroidissement n'est donc pas rationnel et, par suite, n'est pas poussé à sa limite dans la première cuve.

Quatre cuves réfrigérantes de saumure accouplées deux à deux. L'ammoniaque est distribué à ces quatre cuves par un seul conduit général. Il en est aspiré par quatre conduits distincts débouchant chacun à l'une des culasses des deux compresseurs.

La circulation de la saumure est assurée par neuf pompes actionnée à l'électricité et d'un débit total de 1.000 m³ sous 12 kilogrammes de pression.

L'eau nécessaire est extraite des sondages par pompe Mammouth.

La puissance électrique nécessaire à l'activité des pompes et des compresseurs d'air actionnant les pompes Mammouth est de 850 kilowatts.

Ici encore, nous devons souligner la disposition des tuyauteries et des organes de robinetterie qui permettent de réaliser toute espèce de permutation avec facilité et rapidité.

* * *

Au point de vue économie de l'installation frigorifique, il est intéressant de souligner ici les fluctuations que l'on remarque dans la puissance nécessaire au cours de la congélation, puis pendant le maintien de cette congélation.

Marche de la centrale frigorifique.

La congélation des terrains résulte de l'échange de frigories qui a lieu entre le liquide congélateur et le sol. L'importance de cet échange dépend évidemment de la surface de contact, soit donc du nombre de sondages et de la capacité de transmission frigorifique des tubes.

Comme le temps est l'un des facteurs essentiels dans l'économie générale d'un travail de fonçage et de mise en exploitation, il apparaît nettement qu'il doit être réduit au minimum. Il semble, à ce point de vue, qu'il serait utile de multiplier le nombre de sondages, mais ici intervient le coût du matériel de ces sondages et le temps nécessaire à leur forage. De plus, on est limité par l'espace. Les sondages sont au minimum distants d'un mètre.

On est ainsi limité par ces deux conditions et afin d'économiser sur les sondages et de réaliser le maximum d'économie sur le temps, il importe d'utiliser au maximum l'effet frigorifique des tubes congélateurs.

Il faut donc que la quantité de frigories ayant possibilité de transmission aux terrains soit voisine du maximum. Deux facteurs interviennent : la température et le débit.

La quantité de frigories nécessaires pour congeler la masse de terrain suffisante à la température optima pour la résistance peut facilement se déterminer par un calcul théorique.

Cette quantité dépend évidemment :

Des écarts entre la température à laquelle les terrains se trouvent et la température à laquelle se trouvera le noyau congelé.

De la quantité d'eau incluse dans les roches qui, en plus des frigories nécessaires à son refroidissement, absorbera une certaine quantité de frigories pour se transformer en glace.

De la nature et des proportions des diverses roches qui agissent chacune différemment par leur chaleur spécifique. Outre les variations de chaleur spécifique, il faut tenir compte des variations de densités.

Il faudra également tenir compte : *des pertes dues au rayonnement*. En effet, à la partie superficielle, il se produit un réchauffement dû aux actions thermiques extérieures (soleil, air chaud, etc.). En profondeur, il y a réchauffement par suite de la chaleur interne. La progression de la température vers la profondeur exige pour tenir compte des pertes dues à cette cause, un facteur d'autant plus grand que la profondeur croît.

Le terme relatif à ces pertes est toujours évalué en fonction des frigories nécessaires à la formation du mur de glace.

On prend comme facteur de proportionnalité pour les pertes en surface 0,25 et pour celle en profondeur 0,5 à 0,7. On voit que la quantité de frigories nécessaires pour compenser les pertes est presqu'équivalente à celle absorbée pour former le mur de glace.

Certains des termes qui interviennent dans le calcul peuvent être connus avec précision, certains résultent de déterminations expérimentales, d'autres enfin sont choisis empiriquement. Leur valeur doit être prise très largement afin de ne pas s'attirer de mécompte.

* * *

Connaissant ainsi le nombre de frigories nécessaires pour créer le mur de glace, on peut en s'imposant le nombre d'heures nécessaires pour la congélation, connaître l'absorption horaire.

Les frigories ainsi absorbées ne peuvent résulter que du réchauffement de la saumure qui circule, c'est-à-dire du produit de trois termes : le débit horaire, l'écart entre sa température d'arrivée et celle de sortie et sa chaleur spécifique.

L'écart de température ne dépasse jamais 4 à 5° et tend vers des valeurs aux alentours de 1° en fin de congélation. On peut ainsi arriver à connaître le débit horaire et par suite, la vitesse du liquide réfrigérant dans le tube congélateur. Cette vitesse ne peut être exagérée, car au cas d'une vitesse trop grande, l'échange de frigories n'est pas complet, ce qui se marque aussitôt par des écarts entre la température d'entrée et celle de sortie trop faibles et anormaux.

L'écart entre la température d'entrée et celle de sortie ne doit cependant pas être exagérée, car la température de circulation de la saumure ne doit pas dépasser la température des roches de plus de 7 à 9°. Au-delà, en effet, il en résulte pour les différents terrains des irrégularités dans le refroidissement, des prises trop grandes par rapport à d'autres, d'où des tensions exagérées résultant des mouvements de terrains et de la prise trop rapide de certains d'entre eux.

L'écart entre les températures d'entrée et de sortie de la saumure ne peut dépasser 4 à 5°. Au-delà, en effet, outre le fait que nous venons de citer, il en résulterait une congélation de la base du puits, alors que le sommet est encore à une température de plus de 0°; or, nous avons vu que pour la conservation de l'installation, la réussite du procédé et la sécurité des travaux ultérieurs, il importait que la congélation se fît uniformément.

* * *

Les quelques principes que nous venons de résumer donnent déjà des indications sur la marche de la congélation à ses débuts. La saumure sera injectée à une température voisine de la température moyenne des terrains, soit une quinzaine de degrés. Ensuite, elle sera progressivement refroidie. La centrale frigorifique marchera partiellement, les compresseurs ne donnant qu'une partie de la puissance. A mesure que les terrains se refroidissent, c'est-à-dire que les écarts entre les températures d'entrée et de sortie décroîtront, pour une même température d'entrée, on accentuera le refroidissement. Lorsque la température de régime sera atteinte, la presque totalité des machines sera en service. On continuera à maintenir cette température jusqu'à fermeture du mur,

le nombre de machines en service étant tel que le débit soit maximum.

La centrale sera alors en service complet. Toutes les machines seront en marche, sauf peut-être celles en réparation et une ou deux qui restent de secours.

Quand le mur de glace est réalisé, qu'on a des indices nets de sa fermeture sur tout le pourtour et sur toute la hauteur, on continuera quelque temps encore à marche complète, toutes les machines en service; la quantité de frigories à fournir peut déjà diminuer.

Les écarts entre les températures d'entrée et de sortie seront alors stabilisés et seront faibles. Le mur de glace ayant atteint son épaisseur, on pourra réduire l'importance de la congélation et se borner à faire circuler de la saumure froide à une température quelque peu inférieure à celle du mur de glace, de manière à compenser les pertes par radiations en surface et en profondeur. On conservera alors selon leur puissance une ou deux machines en service.

En cas d'accident quelconque, tel qu'insuffisance du mur en profondeur, congélation à intensifier, nouveaux sondages à mettre en circuit, on augmentera la puissance en utilisant à nouveau les machines mises hors service, de manière à effectuer rapidement la congélation et à réduire la durée d'inactivité.

* * *

Lors d'insuffisance du mur de glace, on a eu l'occasion de procéder à deux opérations sur lesquelles nous pensons nécessaire d'écrire quelques lignes :

1° Le mur de glace ayant été reconnu insuffisant, on a décidé d'accroître son épaisseur et sa résistance en abaissant la température de congélation. On a, en conséquence, augmenté la circulation de saumure, puis pro-

voqué un abaissement de température jusqu'au degré voulu. Cette opération a été analogue à celle d'une congélation ordinaire. Quand l'écart de température au début et à la fin du circuit dans un congélateur est devenue faible, on a mis hors service certaines machines et on a continué avec un nombre suffisant pour remédier aux pertes par rayonnements;

2° Le mur de glace présentant une brèche, on a décidé de la masquer par le fonçage de nouveaux sondages (opération réalisée au Charbonnage de Beeringen).

L'installation continuant à fonctionner à marche réduite de manière à maintenir la congélation, on a foré les sondages supplémentaires en ayant soin de provoquer la décongélation alentour du sondage par circulation d'eau chaude.

On a ensuite descendu les tubes congélateurs immédiatement mis en circuit sur un collecteur spécial et on les a fait parcourir par de la saumure chaude, afin d'empêcher que la congélation réalisée par les tubes voisins n'atteigne la périphérie des nouveaux sondages. On a ensuite, dans ce circuit particulier où étaient raccordés les nouveaux sondages, progressivement refroidi la saumure. Ainsi réalisait-on un refroidissement et une congélation uniformes sur toute la hauteur des sondages.

Quand la température de la saumure atteignît le même degré que dans le circuit général, les sondages furent raccordés à celui-ci et l'installation frigorifique fonctionna au complet jusqu'à rétablissement d'un mur continu suffisamment épais.

* * *

Nous voyons ainsi que pour un rendement économique du système, les machines frigorifiques doivent être de grande souplesse, le nombre d'entre elles qui fonctionnent varie intensément suivant les conditions. Les organes de raccord et les robinetteries doivent permettre une mise en service et hors service rapide des machines. Dans les monographies détaillées relatives aux divers puits de Campine, on trouvera les documents et notes relatifs à ces variations de puissance des centrales frigorifiques.

CHAPITRE IV.

Forage des sondages de congélation

Au point de vue du forage des sondages, deux questions doivent être spécialement étudiées : ce sont la rapidité et la verticalité.

La rapidité, car : 1°) 25 à 30 % du temps de l'entreprise sont absorbés par les sondages ; 2°) dans tout travail de fonçage et de mise en exploitation, chaque retard apporté peut être traduit par une perte pécuniaire : immobilisation du capital, inactivité forcée de certains services, etc.

On tente donc d'employer le procédé le plus rapide de forage et en même temps d'organiser le travail de manière à l'activer.

Nous rappellerons ici en quelques traits l'*organisation établie par la Société Foraky* dans les différentes entreprises qu'elle a mené à bien en Campine.

Le forage des sondages a été opéré par battage au trépan. C'est le procédé le plus rapide spécialement pour un genre de sondage tel que celui-ci qui n'exige pas la récolte d'échantillons bien conservés à des niveaux bien connus altimétriquement. Le curage se faisait par injection d'eau et était donc continu. Un tubage était descendu au fur et à mesure de l'avancement et servait à maintenir les terrains en parois verticales.

La vitesse atteinte n'est pas toujours le maximum possible, car il y a une intervention de la nature des terrains. A la suite de nombreux essais, la Compagnie Foraky a pu déterminer l'existence de certaines lois empiriques

entre la vitesse de frappe, la nature des terrains et la déviation du trou de sonde. Il y a des limites à partir desquelles les trous de sonde dévient notablement et ce d'autant plus que la profondeur est plus grande.

L'organisation a permis de gagner un temps notable. Les dispositifs de battage ont été désolidarisés des appareils de manoeuvre. On a utilisé plusieurs appareils de battage facilement maniables qui pouvaient se déplacer sur la circonférence des sondages. L'appareil de manoeuvre était unique, se déplaçait aisément sur molettes provisoires.

Lors des travaux de reprises de congélation à Beeringen, les sondages furent forés dans les marnes par rotation d'une couronne de diamant, puis dans les sables au trépan. Le début du travail se faisait à la main, mais ce système est peu pratique et ne peut atteindre de grandes profondeurs. Le battage au trépan se fit à Beeringen et à Waterschei à partir de la surface. Pour le houiller, on utilisa la couronne de diamant, plus rapide.

A la suite des travaux de Campine, *il paraît donc que le procédé de forage le plus rapide serait en terrain meuble, le procédé de battage au trépan avec curage continu.* En terrains cohérents, le procédé de rodage avec couronne au diamant ou au carborandum.

Quant à *la verticalité du sondage* et à la mesure des déviations, c'est là un point capital. L'accident de Beeringen, où une importante venue d'eau s'est produite au cours du creusement par suite d'une lacune dans le mur de glace, en démontre assez l'importance.

Assurer la verticalité d'un sondage est un problème difficile, aussi a-t-on d'abord cherché à déterminer les déviations de sondages. C'est là un excellent point acquis quant à l'étanchéité et à la continuité du mur de glace.

En établissant des diagrammes figuratifs des positions des trous de sonde à différents niveaux, on peut déterminer les brèches et lacunes de ce mur. Il suffit de forer des sondages supplémentaires en ces zônes défectueuses. Mais pour ces sondages, la question de verticalité se pose encore plus nettement que pour les sondages initiaux. Or, en moyenne, en Campine, le nombre des sondages supplémentaires a été de 25 à 40 % des sondages projetés.

On voit donc que c'est une quasi nécessité pour les sondages supplémentaires d'être bien verticaux et que, au point de vue économique, il y aura une notable économie de matériel, de main-d'oeuvre et de temps à pouvoir assurer la verticalité des sondages.

L'utilisation d'un bon appareil de mesure des déviations et surtout d'un appareil pratique, rapide et maniable permet indirectement d'assurer au sondage une relative verticalité. Dès que le sondage présente une déviation trop prononcée, on le remplit partiellement de ciment ou on y descend une colonne résistante dont l'extrémité supérieure a été déformée et qui agira sur l'appareil de percussion pour le dévier de son trajet initial et lui rendre une direction correcte.

Ce procédé a été employé à Limbourg-Meuse. Mais quand on abandonne ainsi la partie inférieure d'un trou de sonde dévié, il est nécessaire de veiller à ce que son obturation se fasse sur toute la hauteur et soit étanche. L'accident arrivé à Beeringen où un sondage abandonné mettait en relation la nappe aquifère et provoquait une déchirure du muraillement et une importante voie d'eau, montre l'importance de telles précautions.

La Société Foraky a fait breveter un procédé spécial qui lui permet d'assurer la verticalité et de donner n'importe quelle direction à ses sondages. Elle peut même, grâce à ce dispositif, provoquer des déviations

en profondeur. C'est là un appréciable progrès qui trouvera une application immédiate dans tous les travaux de sondages, surtout en présence des résultats obtenus en Campine.

* * *

NOTE. — Le procédé employé par la Société Foraky pour assurer la verticalité du sondage est basé sur les principes suivants :

Ainsi que nous le disions plus haut, la Société Foraky à déterminé les vitesses de frappe qui conviennent aux différents niveaux de terrains.

Par l'utilisation d'un tubage guide (colonne descendue dans le sondage, remplie de ciment et aménagée de manière à présenter au trépan une surface courbe qui provoque la déviation voulue), on peut guider, rectifier ou dévier le sondage.

Les résultats obtenus ont été satisfaisants : pour des profondeurs de 600 mètres, on a eu des déviations de 10 centimètres à 6 mètres.

La Société Foraky a également admis le principe suivant :

Ne forer qu'un nombre restreint de sondages primaires et ensuite un plus grand nombre de sondages complémentaires, ceux-ci étant alors spécialement répartis et guidés de manière à combler les lacunes laissées entre les sondages primaires.

Le bénéfice de cette méthode s'exprime ainsi :

Le nombre de sondages primaires étant réduit, aucun de ceux-ci n'est foré inutilement, c'est-à-dire ne doit être abandonné parce que superflu ou trop dévié en dehors de la couronne de congélation.

Les sondages de complément sont forés en nombre plus grand, mais là où ils sont nécessaires, avec soin et de manière à obturer les brèches.

* * *

On peut dire, à la suite de l'utilisation de cette méthode par la Société Foraky (actuellement dans les travaux de forage en cours sur la concession de Houthaelen pour le fonçage de ces puits) et des résultats qu'elle a obtenus, que c'est là un progrès dans la technique générale du forage et de l'aménagement général des travaux préparatoires au fonçage.

En effet, si peut-être cette méthode est plus lente, elle est indéniablement de meilleure organisation, d'économie notable en travail et en appareillage.

CHAPITRE V.

Les appareils de contrôle de la verticalité des sondages

Le tube congélateur sera entouré, pendant la congélation, d'un manchon de terrain congelé; la fonction de ces manchons, lorsque leur épaisseur le permettra, constituera ce que l'on appelle le « mur de glace ».

Il importe de savoir si la position mutuelle des sondages permet la constitution normale d'un tel mur; en d'autres termes, l'on doit posséder, dans une série de plans horizontaux équidistants (de 10 en 10 mètres par exemple), le graphique orienté de la trace de tous les sondages. Une répartition régulière de ces traces indique la possibilité de la fermeture régulière du mur; un intervalle excessif entre deux traces consécutives marquerait une difficulté, voire une impossibilité de fermeture, et impliquerait l'obligation de faire apparaître, dans les plans horizontaux intéressés, la trace d'un ou de plusieurs « sondages complémentaires » destinés à obturer le vide ainsi réalisé. Ces sondages complémentaires devront, eux aussi, être reportés aux graphiques, afin de vérifier s'ils sont capables d'accomplir leur mission.

Tout ceci revient à posséder, pour chaque sondage, un plan *coté* et *orienté* de la ligne, plus ou moins sinueuse, qui en constitue l'axe. Les cotes pourront être des cotes rondes partant de la surface, de 10 en 10 mètres par exemple.

Pratiquement, ce plan peut s'établir en installant dans le sondage un *clinographe* bien centré, placé, par exemple, de 10 en 10 mètres, et permettant d'enregistrer,

d'une part son *inclinaison* par rapport à la verticale, d'autre part sa *direction* par rapport à une direction matérialisée dans l'appareil et prise comme repère. L'on peut d'ailleurs concevoir un levé montant, suivant un levé descendant, et réalisant ainsi la vérification dite de fermeture du polygone.

Le levé du profil des sondages permet dès lors l'appréciation de ce que pourra être le mur de glace. L'observation du sondage central donnera, d'autre part, les indications relatives à la marche de sa formation.

Les appareils suivants furent employés en Campine :

a) Appareil Erlinghagen;
b) Appareil Gebhardt;
c) Appareil Denis-Foraky;
d) Appareil Anschütz.

Leur caractéristique commune est l'emploi d'un *pendule*, dont on mesure l'écart angulaire avec l'axe du sondage. Cet écart s'enregistre au fond (Erlinghagen, Gebhardt) ou au jour (Denis).

En outre, le plan commun du pendule et de l'axe doit être orienté. L'*orientation immédiate* exige la matérialisation, dans l'appareil, d'une direction constante et indépendante de sa position. L'orientation magnétique est évidemment impossible, seule subsiste la possibilité d'une orientation gyrostatique (Auschütz).

L'*orientation médiate* se fait par le pendule même, par rapport au corps de l'appareil; pour l'utiliser, il faut que l'appareil possède une direction définie. Pratiquement, on le déplace de manière à lui conserver une direction initiale repérée; cette direction est conservée soit par l'emploi de galets tranchants décrivant des génératrices du tubage (Erlinghagen), soit par l'emploi de tiges « antitorsion » (Denis), soit par l'emploi conjugué des deux procédés (Gebhardt). Les deux derniers dispo-

sitifs s'étant parfaitement comportés, alors que le premier s'est révélé impuissant à conserver sa direction, l'on peut en déduire que le guidage par galets coupants est inapte, à lui seul, à diriger un objet dans un sondage, alors que les tiges « antitorsion » en sont parfaitement capables.

APPAREIL ERLINGHAGEN.

L'appareil est décrit dans les revues « Glückauf », 1907, n° 24, p. 733, et « R. U. M. », 4e série, t. XXXI, p. 215.

Pendant longtemps, il a été le seul que l'on pût employer. L'expérience de Campine l'a mis complètement en défaut.

Nous nous bornerons à rappeler que cet appareil comporte deux éléments télescopiques, guidés par galets coupants. L'enregistrement s'effectue dans l'appareil sur une bande de papier.

L'appareil est court, et ses indications successives ne constituent pas, à proprement parler, le levé d'un polygone.

APPAREIL GEBHARDT.

Cet appareil a été décrit notamment dans les revues « Vulkan », du 18 mai 1909, et « R. U. M. », 4e série, t. XXXI, p. 215.

Il est essentiellement constitué d'un corps comportant trois pièces assemblées.

La pièce de tête porte deux couronnes de trois galets coupants à 120°. Ces galets se correspondent suivant la verticale et sont jumelés par paires. La pièce inférieure comporte une seule couronne de trois galets à 120°.

Les galets sont appliqués contre la paroi du tubage par des ressorts à boudin placés dans l'axe de l'appareil,

et agissant par l'intermédiaire de deux systèmes de trois bielles à 120°. L'effort développé par les ressorts se répartit régulièrement, grâce à cette disposition, dans les trois directions, ce qui assure un centrage correct par rapport au tubage et une absence complète de tendance à la torsion.

La pièce médiane, étanche, contient le pendule enregistreur, dont la base est terminée par un style, sur lequel vient s'appliquer, lors de l'enregistrement, une bande de papier horizontale supportée par un châssis mobile suivant la verticale. Cette bande est avancée, toutes les dix minutes, par le mouvement d'horlogerie qui commande le mouvement du châssis. Deux styles fixes, reliés au corps de l'appareil, perforent la bande en même temps que le pendule, fournissant ainsi une base permettant le repérage du pendule (inclinaison et orientation) par rapport à l'appareil.

Le cheminement a lieu au chronomètre, les enregistrements successifs se faisant par déclics successifs d'horlogerie. Pour le mouvement de l'appareil, l'on utilise des tiges spéciales propres à l'appareil Gebhardt, assemblées par tenons, et où le filetage se borne à l'assemblage des pièces de garde. Une telle liaison est exempte de tout effet de torsion. La manoeuvre s'effectue au moyen d'un châssis à guillotine et d'un curseur mobile, le long de ce châssis, dans un plan vertical invariable.

L'expérience a prouvé que l'appareil conservait suffisamment sa direction initiale lors de ses déplacements. L'orientation du pendule à ses diverses stations, repérée par rapport à l'appareil, est donc définie géographiquement, pour autant que la position initiale de l'appareil le soit.

En Campine notamment, les vérifications des levés à

l'appareil Gebhardt résultant, par exemple, de la rencontre des sondages en cours du fonçage, ont montré que l'on pouvait considérer le fonctionnement de l'appareil comme satisfaisant.

Il est à remarquer que l'appareil, étant court, ne fournit pas un levé de polygone, mais simplement l'inclinaison et l'orientation d'une série de tangentes à l'axe du sondage.

APPAREIL DENIS.

Cet appareil a été décrit en détail dans la brochure où la Société Belge Foraky expose ses moyens d'action et cite les travaux qu'elle a effectués.

Il est essentiellement constitué d'un pendule, que l'on peut repérer par rapport au corps de l'appareil.

Les galets de guidage ont été supprimés. La centration est obtenue en réduisant, par le renflement des extrémités du porte-appareil, le jeu permettant son déplacement.

En fait, le porte-appareil est un tube de 10 mètres, légèrement renflé aux extrémité. Cette grande longueur élimine l'effet de parallaxe inhérent au jeu de circulation. En outre, elle permet de lever commodément un polygone dont les côtés ont précisémen 10 mètres. Enfin, le porte-appareil est susceptible d'une construction étanche.

Le mouvement de l'appareil s'effectue, comme dans l'appareil Gebhardt, au moyen de tiges antitorsion, à l'aide d'un châssis à guillotine et d'un curseur.

Telles sont les caractéristiques de l'appareil Denis. Son originalité consiste dans l'emploi, au fond, d'un pendule cônique décrivant, après lancement, une spirale semi-elliptique. Un pendule cônique synchrone (en fait, ce n'est pas un pendule, mais bien un régulateur astatique équivalent) décrit, à la surface, une spirale circulaire homologue. Le repérage de la spirale décrite au fond, par rapport au corps de l'appareil, ainsi que le repérage mutuel des deux spirales, est réalisé par un dispositif électrique d'une grande efficacité. Le lancer du pendule cônique au fond s'effectue également par un courant électrique.

Le repérage de la spirale du fond, par rapport au corps de l'appareil, donne l'inclinaison et l'orientation du tube porte-appareil dans la position considérée, c'est-à-dire d'un côté du polygone à lever. La direction de l'appareil étant connue, le problème est résolu de la même manière que par l'appareil Gebhardt.

Comme pour celui-ci, les levés de sondages effectués en Campine, à l'appareil Denis, ont démontré à suffisance l'exactitude des résultats obtenus (1).

APPAREIL ANSCHUTZ.

Cet appareil a été utilisé par la société allemande Thyssen, avant 1914, au levé des sondages du siège de Zwartberg des Charbonnages Les Liégeois.

A l'encontre des sociétés qui ont utilisé les appareils Erlinghagen, Gebhardt et Denis, les intéressés n'ont pas divulgué les résultats obtenus par l'appareil Anschütz. Dans ces conditions, nous nous bornerons à constater la marche relativement satisfaisante de l'appareil, le fonçage s'étant effectué sans que des déviations excessives ou inconnues aient compromis la fermeture du mur de glace; cette fermeture n'a toutefois pas été réalisée d'emblée.

(1) Nous ne donnons pas ici la description détaillée de l'appareil Denis, et nous n'entrons pas davantage dans l'étude de son fonctionnement. Signalons simplement que la suspension du pendule n'est pas réalisée par un cardan, mais bien par un jeu de ressorts en croix. Lorsque l'appareil est incliné, le pendule n'occupe donc pas la position verticale. L'effet du jeu des ressorts est donc de réduire, dans un certain rapport, la déviation marquée par le pendule, ainsi que la durée de ses révolutions.

Une description a paru dans la revue « Glückauf », 1914, n° 27, p. 1074. Nous ne pouvons toutefois affirmer que l'appareil utilisé aux Liégeois réponde à cette description.

RESULTATS DE L'EMPLOI DES APPAREILS EN CAMPINE.

Charbonnages de Waterschei.

Au puits n° 2, les déviations de sondages furent mesurées aux appareils d'Erlinghagen et de Gebhardt.

Les résultats obtenus furent complètement discordants, tant au point de vue direction qu'amplitude. Alors, par exemple, que l'appareil d'Erlinghagen renseignait des déviations de $0^m,48$, $6^m,23$ ou $4^m,13$, l'appareil de Gebhardt indiquait 10 mètres, $3^m,90$ ou $0^m,76$.

Au puits n° 1, on utilisa seulement l'appareil d'Erlinghagen. Les mesures purent être contrôlées pour certains sondages lors de leur recoupe en profondeur. Les erreurs les plus importantes se marquèrent *en direction* et amenèrent de ce fait des erreurs en amplitude supérieures aux déviations elles-mêmes.

Nous reproduisons ci-dessous quelques exemples :

Numéro de sondage.	Amplitude de la déviat. mesurée à la profondeur de recoupe.	Amplitude constatée.	Erreur de déviation.	Erreur de plan.
7	$3^m,68$	$4^m,28$	4°	$0^m,64$
14	$1^m,80$	$1^m,96$	52°	$1^m,66$
15 b	$2^m,43$	$2^m,96$	60°	$2^m,70$
16	$2^m,44$	$2^m,42$	10°	$0^m,44$
18	$1^m,76$	$2^m,06$	35°	$1^m,16$
31	$3^m,50$	$2^m,70$	58°	$3^m,10$

Comme on peut en juger, des erreurs inadmissibles entachent les déterminations, les rendant inutiles du fait de leur imprécision.

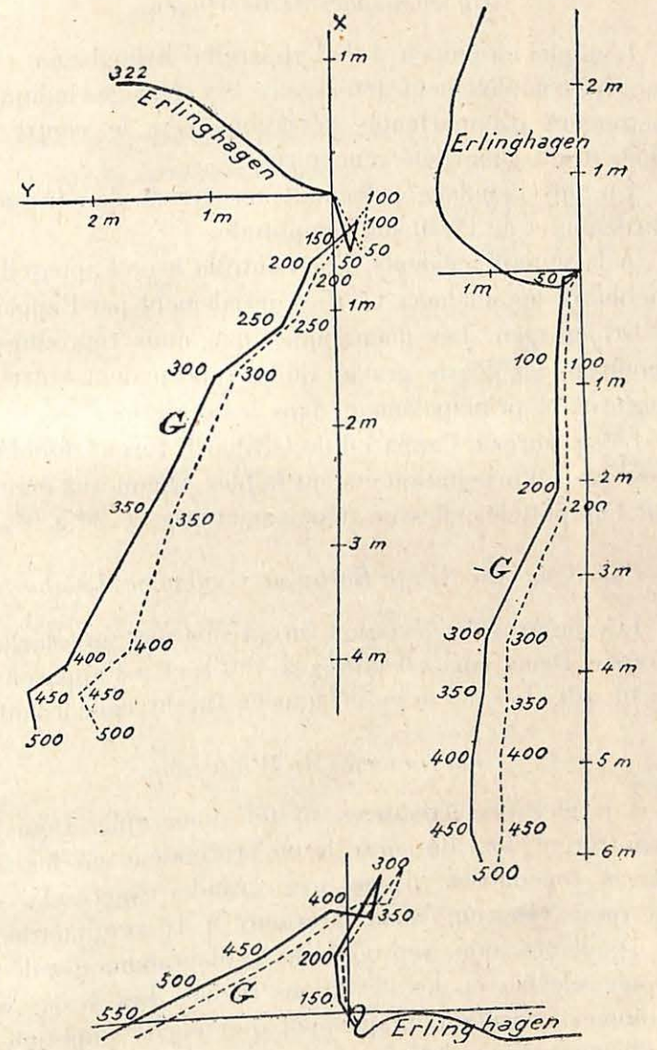


Fig. 7. — Charbonnage de Beeringen.
Diagrammes de déviations de sondages mesurées à l'appareil Erlinghagen et à l'appareil Gebhardt (en double).

Charbonnages de Beeringen.

L'emploi au puits n° 1 de l'appareil d'Erlinghagen s'est montré complètement défectueux. Six sondages indiquant nettement d'importantes déviations vers le centre du puits n'ont jamais été rencontrés.

Un autre sondage présentait une erreur de 31° sur la direction et de 1m,30 sur l'amplitude.

A la suite d'accidents, l'on contrôla avec l'appareil de Gebhardt les sondages vérifiés initialement par l'appareil d'Erlinghagen. Les diagrammes que nous reproduisons montrent les écarts graves qui se marquaient entre les mesures et principalement dans les directions.

Les mesures à l'appareil de Gebhardt furent doublées. Les écarts d'orientation étaient faibles. Quant aux erreurs sur l'amplitude, elles ne dépassaient pas 0m,20 à 0m,70.

Charbonnages Sainte-Barbe et Guillaume Lambert.

Les mesures de déviation furent réalisées au téléclinographe Denis (deux lectures à 180°) et à l'appareil de Gebhardt. Les mesures effectuées furent concordantes.

Charbonnages de Winterslag.

Les mesures effectuées au téléclinographe Denis se montrèrent, lors du contrôle en profondeur sur les sondages rencontrés, d'une très grande exactitude. En moyenne, l'erreur resta inférieure à 15 centimètres.

D'ailleurs, nous reproduisons le diagramme des déviations relevées et des déviations réelles. Les écarts sont minimes, résultant uniquement d'erreur d'amplitude et nullement d'orientation.

De même, nous donnons des diagrammes relevés par le même appareil après rotation de 180°. La concordance est complète.

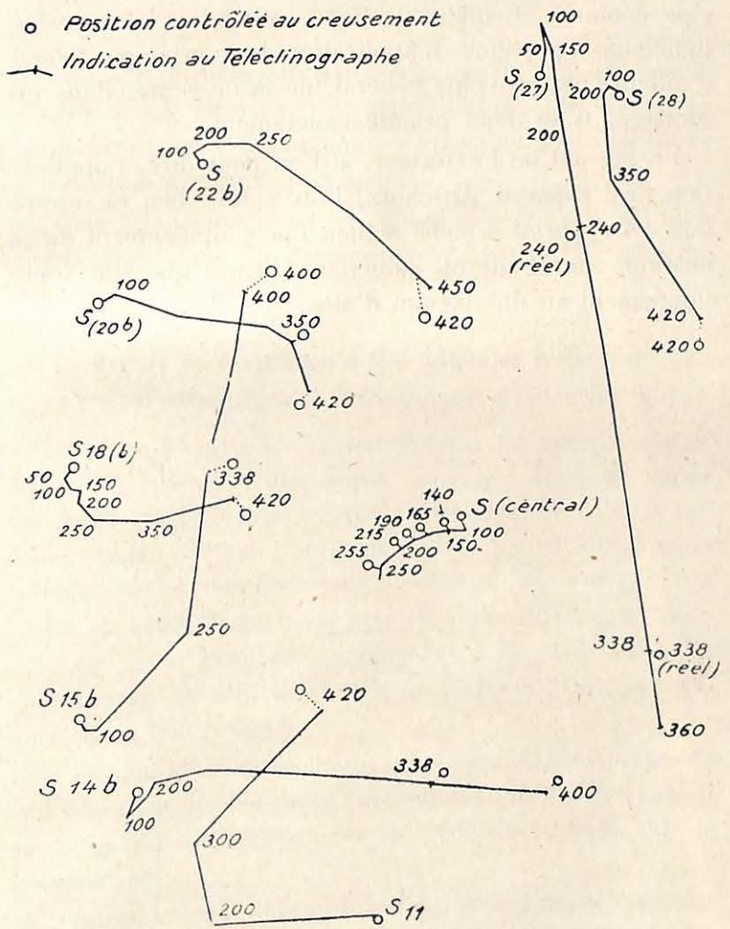


Fig. 8. — Charbonnage de Winterslag.
Quelques sondages dont la déviation a été mesurée au téléclinographe et contrôlée lors du creusement.

CONCLUSIONS.

Les appareils Gebhardt et Denis ont pleinement assumé, en Campine, le rôle qui leur était dévolu. Leur principe commun, l'emploi de tiges antitorsion, s'est avéré judicieux et pratique. L'application de ce principe s'étend d'ailleurs au cas, plus général, de la descente, dans un sondage, d'un objet orienté exactement.

En jugeant de l'extérieur, si l'on peut dire, l'application de l'appareil Anschütz, l'on a tout lieu de croire que cet appareil a mené à bien l'accomplissement de sa mission, sans toutefois pouvoir affirmer que son fonctionnement ait été exempt d'aléa.

CHAPITRE VI

Reprise de congélation en profondeur

Au cours des travaux entrepris, on fut amené dans la concession de Beeringen et dans celle des Charbonnages André Dumont à Waterschei, à effectuer une reprise de congélation à grande profondeur.

Nous allons examiner en détail ces travaux et nous réserverons pour un dernier paragraphe la critique des procédés employés.

Reprise de congélation à 600 mètres de profondeur

(Travail exécuté au Charbonnage de Beeringen.)

La passe à traverser comportait sur 14 mètres d'épaisseur, l'existence d'une nappe aquifère dans les sables boulants. Cette nappe reposait directement sur les terrains paléozoïques. Les sondages de reconnaissance avaient révélé des pressions atteignant 63 atmosphères.

La congélation avait été arrêtée à 488 mètres, le cuvelage en fonte avait été placé jusqu'à la profondeur de 500 mètres. De 500 à 578 mètres, le puits avait un revêtement en béton armé.

L'existence de cette nappe, des importantes pressions qui y avaient été constatées et la nature même des roches ne permettaient aucun autre procédé de fonçage que la congélation.

D'après les résultats obtenus à l'étude de la congélation dans les sables et spécialement de la résistance des murs de glace aux pressions, il était nécessaire, pour un diamètre de creusement de 8 mètres, de ménager alen-

tour un mur de glace de 3m,80 d'épaisseur. La température des sables congelés devait être de — 20°, afin que la résistance fut suffisante, et à condition que la hauteur découverte ne dépassât pas 1m,40.

La congélation devait donc être poussée très bas, se faire sur une grande épaisseur et par suite exigeait de nombreux sondages. L'avancement devait être réduit et la pose du cuvelage se faire immédiatement après le creusement d'une passe d'un mètre. Chaque anneau devait se trouver dans des conditions telles que le terrain congelé fut soutenu avant que le creusement se poursuive. Aussi, chaque anneau était placé définitivement et immédiatement on procédait à la cimentation de l'espace annulaire laissé entre le terrain et l'anneau.

Le moindre vide eût entraîné des déformations de l'anneau de glace, des flux des terrains, des pressions sur les tubes pouvant entraîner des ruptures et d'autres graves accidents.

DISPOSITIONS DE LA MASSE CONGELEE.

Les travaux de fonçage étaient arrêtés à 578 mètres. La congélation fut décidée à partir de 583 mètres. La chambre de congélation se trouvait ainsi à 25 mètres au-dessus de la nappe aquifère. Elle était suffisamment protégée par l'épaisseur des terrains contre la poussée de la nappe sous-jacente.

Cette *hauteur* eut pu difficilement être réduite, car il importait que les sondages fussent rigidement fixés et orientés afin de réussir l'opération. Le massif de béton où se fixaient les tubes-guides était assez haut (4m,50). Il convenait que ce massif fût établi en bon terrain non sujet aux poussées.

De plus, il était de grand intérêt de s'assurer de bonnes têtes de sondages établies en bon terrain et de creuser ceux-ci sur une certaine passe de terrain résistant avant d'aborder la nappe aquifère. Quant à *la limite inférieure* de la masse congelée, deux facteurs intervenaient :

La nature, la résistance et l'étanchéité de la roche sous-jacente;

La sécurité du travail à poursuivre.

La partie superficielle du terrain houiller immédiatement inférieur à la nappe était imprégnée d'eau, totalement fissurée, désagrégée et altérée, en résumé, ne présentait plus aucune qualité efficace de résistance et d'étanchéité.

Il était nécessaire que la masse congelée s'étende largement et profondément dans le terrain primaire et dépasse la zône altérée.

Cette nécessité dérivait également du second point de vue : la sécurité. Lors de la reprise du creusement à la base du noyau congelé, il importait que l'épaisseur des terrains et leur étanchéité soit telle qu'il n'y eut plus crainte de déformation de terrain et de suintement.

La zone altérée était épaisse de 8 mètres, la congélation fut poussée jusqu'à 16 mètres en plein terrain paléozoïque, pénétrant ainsi de 8 mètres en bon terrain et assurant une sécurité suffisante. Quant au diamètre, sa valeur minimum était imposée par les conditions de résistance. Afin d'assurer toute garantie, elle fut fixée à une valeur un peu supérieure. L'épaisseur minimum fut fixée pour la traversée des sables boulants à 4 mètres, sa valeur moyenne étant 4m,65.

La congélation était donc à réaliser sur une hauteur de 55 mètres, de manière à créer autour du puits à creuser une enveloppe de glace de 4m,65 d'épaisseur moyenne.

Afin d'éviter le creusement de chambres trop vastes, trop évasées et trop difficiles à soutenir, le diamètre de base de la chambre de congélation fut limité à 10m,50.

Le diamètre moyen de la masse congelée était de 17m,30. Il était donc nécessaire de placer les sondages divergents et de les disposer de manière à créer un mur suffisamment épais et dans un court délai.

AMENAGEMENT DE LA CHAMBRE DE CONGELATION.

Cette chambre était destinée à servir au forage des sondages, à être équipée en chambre collectrice, les tubes réfrigérants s'y raccordant aux collecteurs circulaires. La nécessité de maintenir une congélation continue et régulière, sous peine de voir s'anéantir tout le travail de fonçage, exigeait que cette chambre se présentât avec le maximum de sécurité et pour les ouvriers et pour les installations :

Sécurité contre les éboulements. — Cette chambre devait être creusée par évasement du puits; le diamètre initial étant 6m,60, devait être porté à 10m,50. Cet évasement se faisant sur 8 mètres de hauteur, l'angle des génératrices avec la verticale était de 14°.

Le revêtement fut soigné de manière à éviter tout éboulement des parois. On établit un muraillement continu en briques de 0m,75 d'épaisseur.

Afin d'éviter toute chute d'objet dans le puits, qui, atteignant la chambre, eut entraîné des dégâts dans le matériel, on établit dans la partie déjà achevée des planchers de sécurité avec recouvrements élastiques de manière à absorber les chocs et éviter toute démolition brutale.

Sécurité contre l'humidité. — Au point de vue de la bonne marche de l'installation, il convenait que la chambre de reprise de congélation fût complètement sèche. Aussi établit-on à la base du puits un plancher réservoir destiné à recueillir les eaux qui suintaient du cuvelage et du revêtement. Une série de rigoles était prévue pour empêcher toute stagnation des eaux dans la chambre de congélation.

Afin de faciliter le travail des ouvriers, la base de la chambre était à parois cylindriques verticales au diamètre de 10m,50 sur une hauteur de 3 mètres. L'éclairage était électrique. Le courant étant amené de la surface par câbles isolés. Le transport des déblais et du matériel se faisait par cuffat, des passages suffisants étant ménagés dans les planchers du puits.

Dans le sol de la chambre, on établit un massif de béton destiné à maintenir les tubes-guides des sondages. Ce massif de béton fut établi dans une rainure circulaire de 4m,50 creusée au fond d'un avant-puits d'un mètre. Cette rainure s'évasait vers le bas de 2 mètres environ.

NOMBRE DE SONDAGES.

Le cylindre d'action congélatrice d'un sondage étant considéré comme d'un diamètre minimum de 3 mètres et la distance entre les sondages ne pouvant guère être inférieure à 1m,50 sous peine d'encombrement, de manoeuvre et de raccordement difficile, pour réaliser un diamètre moyen extérieur de la masse congelée de 17m,30, il fallait disposer une trentaine de sondages sur une circonférence de diamètre voisin de 15 mètres, cette valeur étant évidemment celle atteinte à la traversée de la passe aquifère.

Afin de réaliser l'épaisseur suffisante de 3m,80, il convenait de placer à l'intérieur de cette circonférence d'autres sondages. On en disposa 20 sur une circonfé-

rence de 10 mètres de diamètre. L'épaisseur du mur ainsi créée atteignait environ 4 mètres.

Une troisième série de sondages fut forée : 10 sur une circonférence concentrique de 5 mètres de diamètre. Ces sondages devaient nécessairement disparaître lors du creusement. Ils n'avaient donc qu'un intérêt temporaire : accélérer la congélation vers l'intérieur du puits et provoquer ainsi une fermeture plus rapide, ce qui facilite le travail de creusement et permet de l'entreprendre plus rapidement. Par voie de conséquence, l'existence de ces sondages accélère la congélation des terrains extérieurs en suppléant à l'action vers l'intérieur des sondages périphériques et en réduisant de ce fait le réchauffement de leur saumure.

Ces sondages ne sont évidemment pas poussés sous la base de la nappe aquifère. Leur action n'étant que temporaire et ne concernant que la rapidité de la congélation de la nappe.

Il en est de même d'ailleurs de la série des sondages périphériques. Ceux-ci furent arrêtés à la tête du houiller.

Seuls 20 sondages sur 60 furent poussés jusqu'à 638 mètres. Il n'était point nécessaire, en effet, que la congélation étant poussée jusqu'à cette profondeur, elle le fut avec la même importance. Les eaux de la tête du houiller sont beaucoup moins abondantes que celles de la nappe, leur pression est moindre, les terrains sont plus résistants, il suffit uniquement d'un mur de glace ordinaire pour assurer la sécurité complète du creusement.

FORAGE DES SONDAGES.

Lors du forage des sondages, il y avait divers points essentiels à réaliser et dont il fallait tenir compte dans l'organisation du travail.

Ces points étaient les suivants :

1° placer des tubes-guides et les orienter convenablement, de manière que les sondages, et par suite les tubes congélateurs, se trouvent placés de façon à réaliser, lors de la traversée des morts-terrains, un mur de glace continu ayant au moins l'épaisseur minimum prévue. La tête des sondages se trouvant à l'intérieur d'un cercle de diamètre de 10 mètres, il importait que les sondages divergent. Cette divergence devait donc être le plus exactement possible donnée par les tubes-guides. Ceux-ci devaient par suite être convenablement et soigneusement orientés, posséder une direction rigidement fixée et nullement susceptible de se modifier sous l'action des poussées de terrains.

2° empêcher toute irruption d'eau pendant le forage des trous de sonde. Par suite, le sondage devait être muni d'appareils de captage, de joints étanches, de fermetures hermétiques capables de résister aux pressions de l'eau contenue dans la nappe;

3° le creusement devait s'effectuer le plus rapidement possible avec le moins de difficultés matérielles. De plus, le travail devait être économique, ne présenter aucun danger et écarter toute crainte de venues d'eau.

Les trous forés devaient être soigneusement suivis par des appareils enregistreurs, de manière à dévier le moins possible de leur tracé théorique;

4° au point de vue équipement des sondages pour la congélation, il était primordial que les tubes ne courent aucun danger de rupture ou de suintement, accidents qui dans les conditions de travail entrepris auraient entraîné des conséquences catastrophiques.

Si besoin était, les trous de sonde devaient être munis de tous les organes nécessaires pour remédier à ces accidents ou les prévenir.

Nous allons voir successivement comment ces conditions ont été observées et quels ont été les moyens employés.

1° *Tubes-guides :*

Les dimensions des tubes-guides étaient les suivantes : 8 1/2 pouces de diamètre et 5 mètres de long. Le diamètre était suffisant pour permettre le passage des appareils et des organes nécessaires au creusement et à l'équipement du trou de sonde.

La longueur de 5 mètres est une longueur suffisante pour constituer un guide efficace. L'essentiel est que ce tube soit bien orienté et peu sujet à des déviations par suite des poussées de terrains.

A ce dernier point de vue, les tubes-guides et la partie supérieure des sondages sont établis en excellent terrain, à une distance suffisante de la nappe pour que celle-ci ne puisse agir sur les terrains. De plus, ils étaient sur presque toute leur hauteur (4^{m},50) fixés dans un grand massif de béton rigide. La partie inférieure des tubes était placée dans des potelles creusées à cet effet et l'espace entre les terrains et les tubes fut soigneusement cimenté, de manière à établir une solidarité complète et à éviter tout effort brusque résultant d'une poussée des terrains sur les tubes.

Quant à l'orientation des tubes-guides, elle fut établie par un dispositif construit et vérifié en surface préalablement à son montage en profondeur. On avait ainsi toute garantie quant à l'exactitude de l'orientation des tubes.

Dans la passe dangereuse, les 60 sondages devaient être également répartis sur trois circonférences ayant respectivement comme diamètre 15, 10 et 5 mètres. Au départ à la chambre de congélation, ces tubes étaient répartis sur trois circonférences très voisines et dont les

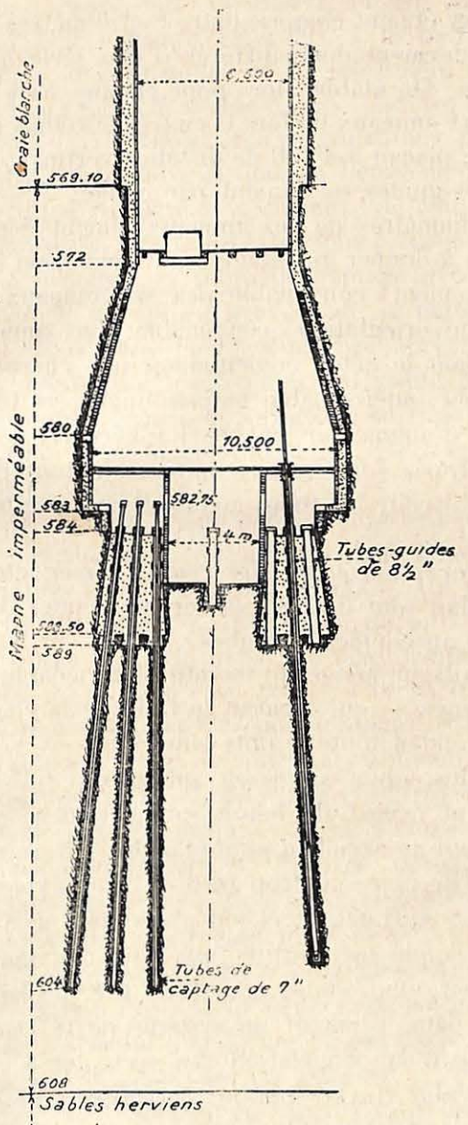


Fig. 9.

diamètres étaient compris entre 8 et 6 mètres. Les orientations devaient donc différer d'une série à l'autre de sondages. On établit alors pour chaque série des sondages, deux anneaux de fers U cintrés et réunis par boulons que l'on plaçait à 4m,50 de distance verticale et auxquels les tubes-guides se fixaient par collier.

Les diamètres de ces anneaux étaient déterminés de manière à donner aux sondages l'inclinaison convenable. Le placement convenable des six anneaux donnaient ainsi une orientation convenable. Les anneaux étant noyés dans le béton constituaient une charpente rigide, un massif indéformable emprisonnant les tubes-guides.

Afin d'augmenter encore l'adhérence des tubes au béton et pas suite rendre impossible tout déplacement quel qu'il soit, les tubes-guides étaient frettés extérieurement;

2° *Prévention contre les venues d'eau, etc. :*

Il fallait tout d'abord éviter les venues d'eau par le fond ou au contact des tubes.

L'épaisseur même de terrain imperméable — ce sont des marnes — qui séparait le fond de la chambre de la nappe rendait toute crainte superflue.

De plus, on avait établi autour des tubes-guides un important massif de béton soigneusement cimenté qui constituait un excellent joint étanche. De crainte que sous l'action de poussées trop fortes et imprévues, ce massif ne vînt à se fracturer et pût provoquer ainsi des venues d'eau — que les marnes imperméables dans lesquelles ce massif était établi rendaient peu probables — on installa dans le massif un système de réfrigération qui, provoquant la congélation des eaux, créa un bouchon imperméable. La congélation à réaliser n'était donc plus ici une congélation circulaire, mais plane, de manière à créer une dalle de glace suffisamment épaisse.

En vue de faciliter cette opération, on eut l'idée de noyer, à l'endroit choisi, c'est-à-dire à la base de la masse bétonnée, des mitrailles de fer, destinées à véhiculer le froid sur toute la surface.

Les organes réfrigérants étaient constitués par des serpentins placés à ce niveau dans le béton et que des conduits verticaux reliaient à la chambre de congélation pour l'amenée et le retour de la soumure froide.

Il restait à installer les tubes de captage nécessaires pour permettre le forage au travers de la nappe. Ces tubes furent descendus dans les marnes après que le sondage eut atteint une profondeur suffisante et alors qu'une épaisseur de terrain imperméable suffisante existait entre le fond du sondage et la nappe. Cette épaisseur fut de 4 mètres.

Afin de réaliser l'étanchéité entre le tube et le terrain, on cimenta soigneusement l'espace annulaire laissé libre. Cette cimentation fut réalisée par injection. Un tube de 40 millimètres fut descendu à l'intérieur du tube jusqu'à sa base. On opéra d'abord un lavage des terrains et du joint. Le tube de captage était fermé à la partie supérieure, l'eau remontait par l'espace annulaire extérieur. Quand l'eau remonta pure, on commença l'injection d'un lait de ciment dense (25 % en ciment). L'injection se poursuivait sous pression jusqu'à ce que le ciment revint épais à la partie supérieure de l'espace annulaire. Le tube de captage étant hermétiquement clos à la partie supérieure, le lait de ciment était forcé de pénétrer dans le seul exutoire possible, l'espace annulaire. Au cas où des fissures eussent existé dans le terrain, cette cimentation les eut au moins partiellement obturées, ce qui renforçait encore l'étanchéité des terrains.

Après avoir laissé le ciment prendre, on essaya ce joint à la pression de 100 atmosphères. Les joints résis-

tèrent. Au cas de défaut d'étanchéité, on eut opéré une nouvelle injection de ciment à plus forte pression avec un lait de ciment plus fluide qui put ainsi pénétrer les joints plus fins.

Ces précautions étant prises en ce qui concerne le fond de la chambre et les joints des tubes, le seul exutoire possible pour les eaux de la nappe à leur rencontre par le sondage était le tube de captage.

Ces tubes de captage s'étendaient de 582^{m},75 à 604 mètres et s'arrêtaient à 4 mètres au-dessus de la nappe aquifère; ils étaient donc cimentés soit aux tubes-guides, soit au terrain sur une vingtaine de mètres de longueur (de 584 à 604 mètres).

Un des dangers auquel il fallait remédier également, était celui de venue d'eau pendant le creusement de ces sondages dans les marnes. En effet, pendant le forage dans les terrains imperméables, on n'était pas exempt de toute crainte : un lit sableux, quelques fractures, un jeu de terrain pendant le forage pouvait immédiatement provoquer une importante venue; aussi, pendant ce travail, forait-on au travers de presse-étoupe fixé sur le tube-guide et capable de résister à des pressions de 60 atmosphères. De plus, un clapet de retenue était adjoint au tube carottier.

Pour le passage de la nappe aquifère, on employa les dispositifs suivants :

Afin d'équilibrer la pression hydrostatique de la nappe, on installa dans le puits une colonne d'équilibre. Le forage était alors opéré de la surface.

La colonne d'équilibre était constituée de tubes en acier de 225 millimètres de diamètre. Ces tubes avaient 10 millimètres d'épaisseur. Ils étaient renforcés à leur base par une seconde colonne intérieure de diamètre

plus petit. Celle-ci existait sur les 200 mètres inférieurs. Cette colonne était constituée par des tubes de sondage.

Afin de veiller à l'étanchéité des joints et à la bonne construction de ces colonnes, la colonne extérieure fut montée directement à l'intérieur du puits en partant du bas vers le haut afin de ne pas exercer d'efforts trop grands sur des joints déjà éprouvés. La colonne intérieure fut descendue de la surface par des tiges de sondage. Son montage se faisait tube par tube à la surface et chaque joint était éprouvé dans les conditions même où il travaillait à la traction.

Le joint des tubes était établi de la manière suivante :

Ces tronçons étaient réunis par un manchon à double filetage d'une hauteur de 30 centimètres. Ce manchon était placé extérieurement afin de ne présenter aucune aspérité intérieure qui put accrocher au passage les outils de sondage. Les extrémités des tubes étaient taillées en biseau. Elles pénétraient dans un anneau de plomb qui s'écrasait au serrage et rendait le joint étanche.

Chaque joint était, après achèvement, éprouvé à des pressions supérieures à celles auxquelles il devait résister. Il en était de même pour les tubes. Les joints étant ainsi éprouvés au montage, il ne fallait point que des fuites prennent naissance pendant le travail. La cause ne pouvait être que des efforts de traction exagérés résultant du poids des colonnes inférieures. Le montage avait été fait de manière que les joints fussent essayés sous des traction qui seraient celles qu'ils subiraient pendant le travail. Mais il ne fallait pas qu'une rupture d'attache vint provoquer une subite augmentation de charge. Aussi, outre les colliers de suspension fixés tous les 15 mètres au cuvelage, on plaça tous les 50 mètres des tirants de suspension capables de supporter le poids de toute la colonne.

Il nous reste encore à étudier le raccord de cette colonne d'équilibre aux têtes de sondages.

Sur le bout supérieur des tubes-guides filetés intérieurement, on visse un tronçon de tube de 1m,50 de haut. (Le bout supérieur des tubes-guides se trouvait en réalité à 582 mètres, à 2 mètres au-dessus de l'anneau de béton, car on avait, après cimentation des tubes de captage, ajouté aux tubes-guides emprisonnés dans l'anneau de béton, des tronçons de 2 mètres, de 584 à 582 mètres, afin de faciliter d'abord l'accouplement et le découplement avec la colonne d'équilibre et ensuite la pose du presse-étoupe traversé par le congélateur; la tête des tubes-guides à 582 mètres se trouvait ainsi à 0m,75 au-dessus de la tête des tubes de captage.) Ce tronçon se termine à la partie supérieure par un plateau. Le raccord se fait par un manchon constitué par deux tubes télescopiques et fixé d'une part à la colonne, d'autre part au plateau. Ce manchon et ces joints sont évidemment essayés aux pressions de service. L'important au point de vue étanchéité était que, lors de la manoeuvre de raccordement et de déplacement de la colonne d'un sondage à l'autre, il y eut le moins de déformation possible transmise à la colonne. Pour l'accouplement et le découplement à un sondage, il suffisait de travailler sur le manchon sans toucher à la colonne. Pour passer d'un sondage à l'autre, il n'a pas été nécessaire de déplacer plus de 50 mètres inférieurs de la colonne: Une dernière opération nous reste à étudier au point de vue étanchéité, c'est celle de la déconnection de la colonne d'équilibre de la tête du sondage.

Pour réaliser cette opération, il était nécessaire de créer à la tête des tubes-guides, entre ceux-ci et les tubes congélateurs descendus de la surface par la colonne d'équilibre, un joint étanche et résistant. Ce joint fut

réalisé par application de la congélation. On fixait autour de la partie supérieure du tube-guide un coffrage métallique à joints étanches où l'on faisait circuler lentement de la saumure froide à — 30° descendue de la surface par cuffats. Sous l'action réfrigérante de cette saumure, un joint étanche de glace était créé en quelques heures et pouvait être maintenu pendant l'opération de déconnection. On remplissait de béton l'espace compris entre le manchon d'arrêt par lequel les congélateurs reposent sur les tubes de captage, et la tête du tube-guide. On établit ensuite à la partie supérieure un presse-étoupe que traversent les congélateurs.

Ces joints donnèrent satisfaction;

3° *Le forage des sondages :*

Le forage fut exécuté avec emploi de deux procédés différents appropriés aux terrains traversés. De plus, ce travail fut exécuté différemment suivant les conditions que l'on rencontrait.

De 584 à 604 mètres, le sondage fut foré à la couronne de diamant, les ouvriers travaillant sur un plancher à 581 mètres où l'on avait installé deux treuils à air comprimé pour la manoeuvre, deux petites pompes pour le curage et deux chariots de rotation; on fora ainsi deux trous simultanément.

Sous 604 mètres, pour la traversée de la nappe aquifère, le forage se fit de la surface. La colonne d'équilibre avait été au préalable remplie d'eau lourde, de manière à équilibrer la pression hydrostatique dès que l'on atteindrait la nappe. On utilisa : le battage au trépan pour la traversée des sables aquifères et de la tête du houiller désagrégée, le rodage à la couronne de diamant pour le terrain houiller sain.

Ces emplois se justifiaient : en terrain sableux, la couronne s'use considérablement et les diamants se perdent ; par contre, le trépan donne un avancement rapide sans inconvénients. Aucun choc violent ne se transmet aux tiges pour entraîner leur rupture ; en terrain cohérent, au contraire, ces chocs trop violents amènent de fréquentes ruptures de tiges et l'avancement est fortement réduit, tandis que le rodage donne un avancement plus rapide et moins d'accidents.

Une gêne qui pouvait se présenter au cours du forage des sondages quant au maniement des outils, résultait de la déviation que la colonne présentait à sa base du fait du raccordement aux sondages. Cette déviation n'a nullement gêné la manoeuvre pendant les opérations.

L'avancement fut d'un sondage par semaine. Afin d'accélérer le travail, on forait trois sondages simultanément. De ce fait, on dut installer dans le puits trois colonnes d'équilibre. Deux de celles-ci furent d'ailleurs utilisées ultérieurement pour la circulation de la saumure. Ces trois colonnes étant également réparties sur la circonférence du puits, il en résultait également que les déviations des parties de base étaient moins accentuées et pouvaient se répartir sur une hauteur réduite, à l'avantage de la sécurité et de l'étanchéité des colonnes.

4° *Tubes congélateurs et installations de congélation :*

Les tubes congélateurs munis de fonds Field et réunis par manchons filetés étaient montés en surface et descendus après creusement du sondage jusqu'à la profondeur nécessaire par la colonne d'équilibre. Les tubes devaient se placer dans le sondage avec leur fond deux mètres au-dessus du fond du trou et leur partie supérieure dépassant un peu l'orifice des tubes-guides. De plus, il est préférable que ces tubes soient bien centrés ;

aussi, lors de la descente, s'arrange-t-on pour obtenir immédiatement ces résultats. Les tubes congélateurs étaient munis d'un manchon tronconique avec fourrure en plomb qui venait se poser à la tête du tube de captage, s'y écrasait et ainsi plaçait automatiquement les tubes à la hauteur voulue.

Le centrage était réalisé avant le placement du presse-étoupe par trois vis de centrage fixées au tube extérieur. Lors de la congélation, par suite de la poussée des terrains, les tubes se sont étirés et certains se sont rompus soit par cisaillement des tubes, soit plus fréquemment au filetage d'un manchon. Cependant, ces ruptures n'entraînèrent pas de conséquences graves, l'intensité de la congélation était telle que la saumure n'exerçait aucune action dissolvante sur la glace et que celle-ci resta intacte.

Cependant, les tubes furent munis de colonnes de secours qui préservent le circuit congélateur contre tout accident par rupture. Ce système fut réalisé dès le début de la congélation au puits n° 2.

L'installation de congélation comportait des couronnes collectrices fixées aux têtes des tubes congélateurs. Les joints et raccords furent essayés isolément à forte pression pour éviter toute fuite et accident. La saumure était amenée et reprise par deux des colonnes d'équilibre. Ces colonnes ne furent pas calorifugées. Elles subirent une auto-calorifugation en se couvrant de givre, par condensation et prise de l'humidité de l'air. Quand cette couche de givre atteignit une épaisseur suffisante, elle fut un calorifuge suffisant. Afin de se prémunir contre tout accident grave qui aurait pu survenir aux congélateurs ou au collecteur, les deux colonnes furent munies de vanne ou clapet à leur base. Au puits n° 2, des vannes furent établies à chaque tube congélateur. Un danger que présentaient ces colonnes, consistait dans les fuites

qui pouvaient se produire aux joints du fait de la contraction des colonnes par suite du refroidissement.

Le rétrécissement calculé fut de 20 centimètres; réellement, il atteignit 15 centimètres. Afin de ne pas employer des joints de dilatation, ce qui eut exigé le démontage complet des colonnes, on suspendit la tête des colonnes dans des carcans, eux-mêmes fixés à des dynamomètres. Suivant les indications de celui-ci, on faisait descendre les tubes de manière à éviter toute tension exagérée. Le raccordement des colonnes aux conduites d'amenée et de retour en surface se faisait par des conduits flexibles.

La suspension des colonnes est ainsi réglée que la moitié du poids pèse sur la base et que l'autre moitié soit suspendue aux dynamomètres. Les attaches sont remplacées par des guides permettant le coulissage des colonnes.

CONGELATION.

La congélation fut réalisée avec une puissance de 300.000, puis de 600.000 frigories-heures.

Le refroidissement se fit d'abord graduellement par de la saumure progressivement refroidie. La fermeture du mur de glace fut obtenue en moyenne en 26 jours. Elle fut indiquée par un sondage central.

Celui-ci fut creusé avec les mêmes précautions que les autres sondages. Il fut poussé jusqu'au houiller. Il fut muni de deux tubes : l'un de 120 millimètres de diamètre ouvert à sa base et un autre, intérieur au premier, fermé à sa base. L'espace annulaire est fermé hermétiquement, un robinet permet l'écoulement de l'eau qu'il contient et un manomètre indique la pression à laquelle se trouve cette eau. Dès que cette pression dépasse 63 atmosphères, on a l'indice de la fermeture du mur de glace. On peut ouvrir le robinet et ainsi éliminer l'eau qui se comprime par suite de la progression du mur de glace.

On évite ainsi que cette eau, surcomprimée, ne provoque des gonflements et soulèvements de fond. Dans le tube intérieur, on descend dans un bain de saumure, un thermomètre destiné à donner la température des roches à mesure que la congélation progresse.

Les températures de la saumure étaient : au départ, — 30°; au retour, — 20°,5. La température du terrain : 27°.

ACCIDENTS SURVENUS PENDANT LE TRAVAIL.

L'accident le plus important survenu pendant le travail n'a pas eu de graves conséquences :

Il résultait du gonflement des assises marneuses et sableuses sous l'action de la congélation. La seule issue offerte à ces terrains consistait en la partie découverte dans le puits. Le fond se soulevait, provoquant ainsi un étirement des tubes et même leur cisaillement. Ce soulèvement dépassa 12 centimètres.

Lorsqu'on aborda le creusement, le soulèvement diminua, mais le diamètre de l'excavation creusée diminua. On dut poursuivre le creusement avec pose du cuvelage en descendant.

Reprise de congélation à 500 mètres de profondeur

(Travail exécuté aux Charbonnages André Dumont.)

Sauf quelques variantes, le travail a été entrepris ici sur le même programme qu'à Beeringen.

La nappe aquifère hervienne moins épaisse qu'à Beeringen, se présentait ici avec des pressions ne dépassant pas 50 atmosphères.

On établit, en conséquence, à 464 mètres, soit une trentaine de mètres au-dessus du niveau supérieur de la

nappe, une chambre circulaire tronconique de 9m,45 de diamètre. Le revêtement fut constitué par des blocs en béton maçonnés. L'inclinaison des parois était d'environ 62°.

Le nombre de sondages fut de 66, dont 60 de congélation, un central et cinq supplémentaires destinés à s'écraser sous le gonflement des marnes herviennes par la congélation. Les 60 sondages de congélation étaient répartis sur quatre circonférences concentriques : 10, 10, 20, 20 en allant de l'intérieur à l'extérieur. Ces sondages étaient disposés de manière alternante, afin que leurs cercles d'influence se recoupent et constituent un mur étanche. L'épaisseur minimum du mur de glace était de 4 mètres. Les sondages intérieurs avaient uniquement pour but d'accélérer la congélation.

Ils étaient tous largement poussés dans le houiller. Les sondages extérieurs étant poussés seulement jusque 514 mètres. Les autres au-delà. Tous les sondages étaient placés extérieurement au diamètre à creuser, ce qui n'entraînait plus comme à Beeringen la nécessité d'un démontage des cercles intérieurs. Le massif de béton où l'on emprisonna les tubes-guides fut de 2 mètres de profondeur seulement, mais se montra suffisamment indéformable.

Le forage des sondages se fit directement de la surface par quatre colonnes d'équilibre. Le sondage central fut muni également d'une colonne d'équilibre.

Les tubes de captage des sondages furent descendus par l'intérieur des colonnes, de même que les congélateurs constitués par deux tubes concentriques de 94 et 128 millimètres de diamètre. Afin d'éviter l'usure des colonnes de battage par frottement du trépan et ainsi se mettre à l'abri de tout accident de rupture, ces colonnes furent établies à doubles parois : deux tubes concentriques de 9 à 8 pouces.

Les joints furent essayés à 80 atmosphères. L'installation de congélation comporta le placement de colonnes spéciales d'amenée et de retour de saumure. Ces colonnes furent soigneusement calorifugées avec des fourrures de liège et munies de boîtes de dilatation. On en plaça une tous les 100 mètres.

Pour se prémunir contre des soulèvements du fond, on fora, ainsi que nous l'avons déjà dit, à l'avaleresse cinq sondages sur un cercle de diamètre de 5m,60, poussés jusque 496 mètres et faiblement inclinés. Ces sondages se fermèrent, mais ne prévinrent par le soulèvement du fond qui eut quand même lieu.

Le sondage central était muni d'une colonne d'équilibre et celle-ci avait été pourvue d'une boîte de raccourcissement, afin d'éviter une rupture par compression. Le raccourcissement fut de 22 millimètres au puits n° 2.

Comme incident, on peut citer le défaut d'étanchéité que présentèrent certains joints des tubes de captage. Dans ce cas, on a approfondi le sondage de quelques mètres (7m,50) et descendu un tube un peu plus étroit à l'intérieur du premier et cimenté celui-ci. Ce nouveau joint s'est montré excellent.

Les tubes congélateurs furent munis de tubes de secours qui ont pu être retirés après congélation. Comme à Beeringen, le creusement se fit par petites passes avec pose du cuvelage en descendant de manière à soutenir directement les terrains.

La congélation fut réalisée avec deux machines frigorifiques d'une puissance totale de 250.000 frigories/h. Les températures de régime de circulation de la saumure furent de 25°.

Conclusions

L'examen de ces deux travaux importants nous amène à des conclusions intéressantes :

1° *Des reprises de congélations ont pu être réalisées à grande profondeur dans des conditions particulièrement difficiles de pressions.* Le travail a pu être mené rapidement et sans aucun danger.

Le mur congelé est suffisamment résistant à condition que la congélation soit intense, le mur épais, les passes découvertes de petite hauteur et immédiatement cuvelées.

2° *Les installations de forage et de congélation ont pu être établies et présenter suffisamment de résistance et d'étanchéité* pour les pressions auxquelles elles étaient soumises.

3° Au point de vue forage, *celui-ci doit être exécuté de la surface au travers d'une colonne d'équilibre.* Une partie du forage a pu être réalisée en profondeur, mais il est évident que le travail est plus malaisé du fait des installations exiguës et peu importantes qu'on est obligé d'utiliser.

Par contre, l'utilisation de ce procédé pour le forage de la partie correspondante aux tubes de captage permet plus de facilité dans le placement et l'établissement des joints de ceux-ci.

Le procédé de forage opéré de la surface permet d'utiliser des procédés plus rapides et plus puissants. Les colonnes d'équilibre présentant des risques d'usure plus grands doivent être renforcées; tous les tubages sont nécessairement descendus par les colonnes, ce qui exige de celles-ci le minimum d'obstruction, des parois intérieures lisses, des déviations réduites, mais ce procédé place le foreur dans une sécurité parfaite quant au recoupement

intempestif d'une nappe d'une cassure en relation avec la nappe à haute pression. L'équilibre s'établit immédiatement.

4° Au point de vue congélation, nous remarquons qu'*il est utile, surtout en terrain argilo-marneux et marno-sableux, bref,* en terrains sujets à gonflements par la congélation, de *munir les congélateurs de tubes de secours* (tubes que l'on peut facilement retirer après congélation), de veiller à placer des dispositifs de raccord permettant d'isoler directement et d'empêcher toute circulation de saumure dans un tube défectueux.

On remarquera à ce point de vue que l'expérience de Beeringen nous permet d'induire que le danger d'une rupture de tube est d'autant moins grave que la congélation se fait à plus basse température, la glace présentant d'autant moins de facilité à se dissoudre dans le liquide congélateur.

L'emploi *de collecteurs en profondeur et de deux conduits d'amenée et retour vers la surface a été réalisé* avec succès. Ce système est plus économique et moins encombrant que le procédé avec collecteur en surface et congélateurs descendant dans le puits.

A *propos des conduits d'amenée et de retour,* nous avons vu l'emploi de deux systèmes différents : *a)* une installation spéciale, soigneusement calorifugée, à Waterschei; *b)* l'emploi des colonnes d'équilibre auto-calorifugées par une couche de givre avec dispositif de suspension pour le rappel du raccourcissement, à Beeringen. On peut reprocher à ce système la perte de frigories pour la condensation et la prise du givre, l'effet de cette gaine de glace sur le métal, le danger de chute de blocs dans le puits. L'emploi de ce système à Beeringen n'a entraîné aucun mécompte. Les pertes de froid de la saumure pen-

dant la descente du puits ont été pratiquement nulles sitôt que la couche de givre s'est formée.

Elle a épargné un montage spécial.

5° Au point de vue de l'*aménagement du sondage central, le système employé à Beeringen apparaît plus pratique*. S'il exige une fermeture du tubage hermétique et résistant à forte pression, par contre, il supprime l'encombrement du puits par la colonne d'équilibre et ses supports.

6° Au point de vue *poussée des terrains*, nous remarquerons que le forage de cinq sondages jusqu'à la base des marnes imperméables a fortement réduit et presque annulé le soulèvement du fond, et par suite réduit les chances de rupture de tubes par étirement.

7° Au point de vue de l'*épaisseur du bouchon de terrain imperméable* à laisser entre la chambre de congélation et la nappe, nous remarquerons que cette épaisseur ne peut être exagérée sans entraîner des frais supplémentaires de forage, mais qu'elle ne peut également être trop réduite afin de permettre au cas d'établissement d'un joint défectueux à un tubage de prolonger celui-ci par un tubage plus étroit que l'on cimente à son tour. Ce procédé paraît plus pratique que celui de renforcer le joint par de nouvelles injections.

8° Enfin, il apparaît également à la suite de ces travaux qu'il n'est *aucun point, même de détail, qui n'ait son importance et que le travail ne sera assuré d'une parfaite réussite que par le soin méticuleux et l'étude soignée des différents organes.*

CHAPITRE VII.

La Décongélation

Une opération délicate à entreprendre au cours du travail consiste dans la décongélation du puits.

On admettait généralement, avant les travaux de Campine, que la mise sous tension du cuvelage se faisait seulement lors de la décongélation et que par suite, il importait de placer le cuvelage dans des conditions telles qu'il supporte cette mise à charge le mieux possible et que celle-ci se fasse régulièrement sur tout le pourtour et progressivement suivant la hauteur. Aussi croyait-on nécessaire de noyer le puits avant d'opérer la décongélation, et de procéder de manière que le dégel soit uniforme sur toute la périphérie.

Nous allons voir comment on a tenté de guider l'opération en Campine et quelles conclusions on peut en tirer.

Mais tout d'abord, nous pouvons dire qu'à la suite des essais de M. Sauvestre à Beeringen, l'idée d'une *mise sous tension du cuvelage différée jusqu'au dégel est une idée erronée*.

Elle provient, en effet, du fait que l'on considérait la glace et les terrains congelés comme résistant à la manière de substance rigide. Il n'en est rien. Les essais expérimentaux de M. Sauvestre, sur lesquels nous ne reviendrons pas, ont suffisamment prouvé que la glace et les terrains congelés sont plastiques. Par suite, la mise sous tension du cuvelage se fait peu de temps après son placement. Une preuve flagrante en est que les passes de cuvelage subissent un certain allongement après quelques jours ou quelques semaines.

Noyer le puits, apparaît donc comme une opération peut-être inutile et en tout cas onéreuse du fait qu'elle nécessite des pertes de temps et d'énergie pour l'épuisement.

La *nécessité de régler la marche de la congélation* est cependant incontestable, car les irrégularités qui peuvent s'y marquer ont un effet sur la résistance du cuvelage, sur son étanchéité, ainsi que sur l'état des tubes congélateurs. Les mises en contact avec les nappes aquifères doivent particulièrement se faire régulièrement et progressivement. De plus, cette manière de procéder présente encore de l'intérêt parce qu'elle permet d'activer la décongélation.

En effet, si on laisse la décongélation s'effectuer naturellement, elle sera lente et irrégulière. Elle dépendra du réchauffement progressif des terrains par la chaleur interne, de leur plus ou moins grande masse congelée, ainsi que de leur facilité d'absorption de chaleur.

Par suite, le retour à la situation normale sera lent et irrégulier. Or, il est important au moment de la décongélation, de rendre le cuvelage complètement étanche par un matage soigné des joints. La décongélation se faisant irrégulièrement, cette opération sera longue, irrégulière et devra être reprise plusieurs fois. De plus, du fait du réchauffement et de la mise sous charge définitive du cuvelage, des fissurations peuvent se présenter dans certaines pièces de cuvelage, il importe que ce travail soit fait rapidement et que l'on ne soit point forcé à de trop fréquentes réparations.

Remarquons ici que certains entrepreneurs peuvent défendre l'idée de noyer le puits en se basant sur la production de ces fissures. Leur existence paraît incontestablement prouver une mise sous tension. Nous ne nions pas qu'à la décongélation, il n'y ait mise sous charge définitive, mais la mise en charge est déjà partielle et largement réalisée avant même que la décongélation soit entreprise. De plus, il y a lieu de tenir compte dans la production de ces fissures des tensions internes dues au mode de fabrication. On remarque d'ailleurs que fréquemment ces fissurations se font au voisinage des trous ménagés pour l'injection ultérieure du ciment.

La production de ces fissures donnant une certaine venue d'eau, peut, disions-nous, justifier l'opération de remblayage du puits par l'eau avant la congélation. Au cas où des fissures un peu importantes se produiraient, il y a équilibre hydrostatique entre les deux faces du cuvelage fissuré et ces fissures sont progressivement obturées à mesure de l'épuisement. Il en est de même pour les matages imparfaits qui pleurent. Mais nous devons dire que dans tous les travaux exécutés en Campine, cette fissuration et cette défectuosité de matage n'a jamais donné que des venues excessivement faibles et que la différence de pression entre les deux faces du cuvelage n'a pas entraîné de grave conséquence.

De ces quelques considérations théoriques, il résulte que : *La décongélation doit être forcée principalement afin de l'accélérer et qu'il est inutile de noyer le puits préalablement. Elle doit surtout être réglée de manière à être uniforme et progressive.*

Examinons maintenant le processus de la décongélation dans les différents travaux de Campine.

Charbonnages de Beeringen.

La décongélation se fit naturellement, sans noyer le puits, par simple suppression de la circulation de la saumure. On procéda au matage des joints avant la cessation de la circulation de saumure. On en fit encore postérieurement. Les venues d'eau furent relativement faibles.

Charbonnages de Helchteren-Voort.

Au puits n° 1, la décongélation a été entreprise après une révision complète du puits.

Cette révision comportait comme dans les autres puits : mater les joints, vérifier les boulons, les serrer et les munir de rondelles de plomb, injecter du ciment derrière le cuvelage, obturer les trous d'injection et parachever le picotage. En un mot, assurer l'étanchéité la plus complète du cuvelage.

Cette révision s'est faite de bas en haut. On a ensuite procédé au remplissage du puits. On y a descendu jusqu'à la base de la partie congelée des tuyaux où on a provoqué une circulation d'eau réchauffée, de manière à uniformiser la température de l'eau du puits. Dans les tubes congélateurs, on a progressivement réchauffé la saumure, puis fait circuler de l'eau dont la température a été poussée jusque 50°. Le circuit est exactement le même que celui du liquide congélateur. De la sorte, là où les sondages étaient plus resserrés et le froid plus intense, on enverra le plus de calories et le dégel se fera rationnellement. Le noyage du puits avait commencé le 30 décembre 1924. Le 15 mai 1925, au cours du dénoyage, l'épuisement atteignait 510 mètres de profondeur quand une série d'accidents : venue d'eau en profondeur, incendie en surface, vinrent retarder l'achèvement de l'opération.

Charbonnages des Liégeois.

La décongélation fut réalisée par suppression complète de la circulation de saumure sans opérer le noyage du puits. Afin de guider la décongélation, on décida de faire déboucher un courant d'air chaud contre le cuvelage par une série de tubes reliés à un ventilateur en surface. L'orifice de ces tubes était progressivement descendu dans le puits. Cela ne donna aucun résultat. On alluma ensuite des braseros à différents niveau sans plus de succès. Finalement, on abandonna la décongélation à elle-même. Elle se fit naturellement, mais fut longue et exigea de fréquentes opérations de rematage.

Charbonnages de Winterslag.

Après avoir noyé le puits, on fit circuler dans les tubes congélateurs de la saumure progressivement réchauffée et en injectant

au fond du puits de l'eau chaude. On avait préalablement procédé aux opérations que nous avons déjà indiquées aux Charbonnages de Helchteren.

La décongélation a pu pratiquement être déclarée achevée dès que les températures de départ et de retour de la saumure réchauffée eurent atteint des valeurs sensiblement égales.

Charbonnages André-Dumont.

On procéda de façon identique pour décongeler la première passe de congélation au siège de Waterschei. Pour la passe de 485-510 mètres où l'on avait réalisé une reprise de congélation, la décongélation se fit naturellement.

Charbonnages de Limbourg-Meuse.

La décongélation se fit ici en injectant dans les congélateurs de la saumure progressivement réchauffée. Cette manière de procéder s'est montrée excellente.

Conclusion.

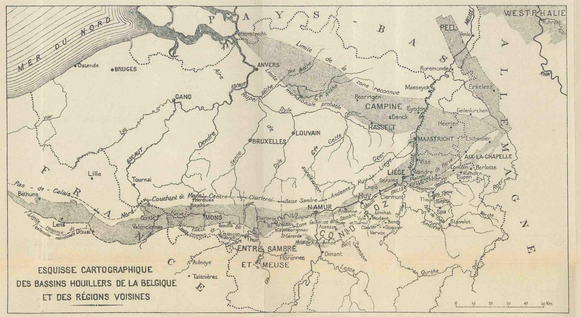
Il est superflu et peu économique de noyer le puits avant congélation.

Le moyen le plus simple et le plus pratique d'accélérer le dégel, c'est de réaliser dans les congélateurs une circulation de saumure progressivement réchauffée. C'est d'ailleurs un système rationnel.

Il est désastreux et peu pratique de prétendre laisser la décongélation se faire spontanément. L'opération est lente et son achèvement incertain, d'où retard dans le parachèvement du puits et supplément d'entretien.

ÉCHELLES STRATIGRAPHIQUES
DES BASSINS HOUILLERS DE LA BELGIQUE
ET DES RÉGIONS VOISINES

— 1930 —


ESQUISSE CARTOGRAPHIQUE
DES BASSINS HOUILLERS DE LA BELGIQUE
ET DES RÉGIONS VOISINES
MER DU NORD
FRANCE
PAYS-BAS
ALLEMAGNE
WESTPHALIE
Ostende
BRUGES
GAND
ANVERS
Limite de la Flandre orientale et occidentale
Limite du Brabant et de la province d'Anvers
CAMPINE
Turnhout
Herentals
Malines
Tirlemont
BRUXELLES
LOUVAIN
Wavre
Nivelles
Lille
Tournai
Roubaix
Tourcoing
Courtrai
Mons
Valenciennes
Quiévrain
Maubeuge
Avesnes
Hirson
Charleroi
Binche
Thuin
Namur
Dinant
Philippeville
Couvin
Rocroi
Givet
Florennes
Walcourt
Beaumont
Chimay
Virton
Arlon
Neufchâteau
Bastogne
Marche
Saint-Hubert
Libramont
Limite des bassins houillers de la Belgique et des régions voisines
Limite des bassins houillers de la Belgique
Limite des régions voisines
Limite des provinces
Limite des arrondissements
Limite des cantons
Limite des communes