la congélation des sols*

par

Renato Tornaghi

Ingénieur, responsable de la Division Géotechnique de la Société Ing. G. Rodio et C.S.p.A. - Milan

Introduction

Les effets du gel et du dégel naturel sur les sols ont été étudiés depuis longtemps dans les pays nordiques où de tels problèmes se posent pour les routes et les ouvrages, particulièrement en Russie et au Canada.

Comme on le sait bien, en gelant l'eau augmente de volume, produisant des soulèvements; lors du dégel les caractéristiques mécaniques peuvent être modifiées négativement dans une mesure très importante pour les sols à granulométrie fine où la congélation lente cause des migrations d'eau avec par conséquent des augmentations locales de la teneur en eau et des altérations structurelles dues à la formation de lentilles de glace.

D'autre part les effets de consolidation et d'étanchement produits par les basses températures peuvent être utilisés au moyen de la congélation artificielle temporaire, pour résoudre des problèmes de génie civil où d'autres méthodes (injection, parois, rabattement de nappe, etc.) ne sont pas applicables ou convenables.

Ce sont les mineurs qui ont utilisé la première fois la congélation artificielle (qui est le thème de cette conférence) pour le fonçage de puits vers la fin du siècle passé. De nombreuses applications ont été faites toujours dans les mines, mais c'est après la dernière guerre mondiale que le domaine d'utilisation s'est étendu et un progrès considérable a été fait dans la recherche théorique-expérimentale et dans la technologie.

Sur la base des expériences acquises ces dernières années (et nous nous référons surtout aux connaissances plus directes des applications faites par la Société Rodio en Italie depuis 1971), on peut à présent considérer qu'une maîtrise suffisante tant au point de vue du projet que de l'exécution des travaux de congélation des sols a été atteinte.

* Conférence au Comité Français de la Mécanique des Sols et des Fondations, Paris, 17 mai 1982

En particulier on a établi avec une bonne marge de confiance le schéma du projet d'intervention selon les problèmes posés, la technologie et le critère de choix entre les méthodes applicables, c'est-à-dire :

- à circuit ouvert (congélation rapide à l'azote liquide);
- à circuit fermé (congélation lente avec groupe frigorifique, ou à la saumure);
- combinaison des deux méthodes susdites.

Au point de vue théorique, la recherche, faite surtout par les Russes avec référence directe à la congélation artificielle, a clarifié plusieurs aspects relatifs aux propriétés thermiques et mécaniques des sols congelés, pour la définition des paramètres de calcul des projets.

Les résultats de ces recherches sont exposés dans de nombreux articles publiés dans les revues techniques et les communications présentées aux conférences sur des sujets divers de mécanique des sols; il y a aussi plusieurs traductions en anglais de textes russes. En plus il faut signaler l'organisation des conférences exclusivement dédiées à la congélation des sols tous les deux ans à partir de 1978; la première a été faite à Bochum (Ouest Allemagne), la deuxième à Trondheim (Norvège) et la dernière en juin 1982 aux États-Unis.

Au point de vue pratique, le projet et l'exécution des travaux en question ont été affinés remarquablement sur la base des informations acquises dans diverses applications avec différents types de sol et plusieurs technologies.

En ce qui concerne les types de sol, le domaine d'utilisation le plus intéressant s'étend des argiles aux sables fins; comprenant aussi les sables et graviers avec une abondante matrice limoneuse et/ou argileuse; ce sont les cas où les autres méthodes de consolidation temporaire ne seraient pas possibles ou convenables économiquement ou suffisamment sûres.

En principe l'injection peut être compétitive lorsque le coefficient de perméabilité est supérieur à 10^{-5} m/s; elle est de toute façon avantageuse ou nécessaire

comme traitement préalable pour réduire la teneur en eau du sol à congeler s'il y a des couches facilement injectables avec des coulis stables de ciment et particulièrement si ces couches sont le siège de circulation d'eau au-delà d'une certaine vitesse.

En ce qui concerne les types de problèmes solubles, il s'agit surtout de traitements préalables (ou de prompt secours) pour des excavations de puits et le creusement de tunnels.

A l'heure actuelle les applications sont limitées à des cas particuliers, mais il est aisé de prévoir une plus large diffusion dans le prochain futur, pour les raisons suivantes :

- une meilleure connaissance de procédés de congélation de la part des maîtres d'œuvre;
- une meilleure compétitivité par rapport aux solutions alternatives traditionnelles comme par exemple les injections chimiques;
- les considérations écologiques, c'est-à-dire les problèmes de pollution, qui peuvent être déterminantes dans les zones urbaines.

1 Caractéristiques thermophysiques et mécaniques des sols congelés

La littérature présente une documentation très vaste sur ce sujet, sur la base d'essais en laboratoires spécialement équipés et d'interprétations théorico-statistiques; nous nous limiterons à quelques données indicatives d'ensemble.

La chaleur spécifique d'une masse de sol où l'eau est partiellement transformée en glace, peut être exprimée par la relation :

$$(1)\quad C = \frac{C_{ts} \cdot \nu_s(1-n) + C_w(1-i)\, n\nu_w S + C_g \cdot n \cdot \nu_w \cdot S \cdot i}{(1-n)\cdot \nu_s + n \cdot \nu_w \cdot S}$$

(kCal/kg °C)

où les paramètres en jeu sont :

- les poids spécifiques du sol sec ν_s et de l'eau ν_w (kg/m³);
- la porosité n et le degré de saturation S;
- les chaleurs spécifiques du sol sec C_{ts}, de l'eau C_w et de la glace C_g (kCal/kg °C);
- le rapport i entre la quantité d'eau glacée et celle totale (eau + glace).

Ce dernier rapport est généralement égal à 1 pour les sables, et toujours inférieur pour les limons et les argiles augmentant avec la diminution de température, comme on peut voir dans la figure 1.

La conductibilité thermique du sol dépend de nombreux facteurs comme la porosité, la teneur en eau, la composition chimique et les contacts intergranulaires; les résultats de déterminations expérimentales sur divers types de sol sont donnés dans la littérature.

Il faut remarquer que l'absorption de chaleur par les sols silteux-argileux est 2-3 fois inférieure à celle des sols incohérents. Par conséquent les temps de congélation augmentent avec la finesse granulométrique.

Le projet doit tenir compte de ces variables pour un écartement convenable des sondes congélatrices.

Les sols congelés se comportent comme des corps élastiques-visqueux-plastiques; la relation contrainte — déformation est fortement influencée tant par la température que par la durée d'application des contraintes.

A titre d'exemple, la figure 2 montre les résultats d'essais de compression simple sur des échantillons de sable, congelés à 3 températures différentes (−5 °C, −10 °C et −20 °C) avec des temps d'essai compris entre 1 et 12 heures.

Les propriétés mécaniques des sols congelés sont donc liées aux phénomènes de fluage, qui dépendent de nombreux facteurs analysés dans la littérature sur la base d'essais de compression simple et/ou triaxiale où les variables principales sont :

- la granulométrie;
- la porosité;

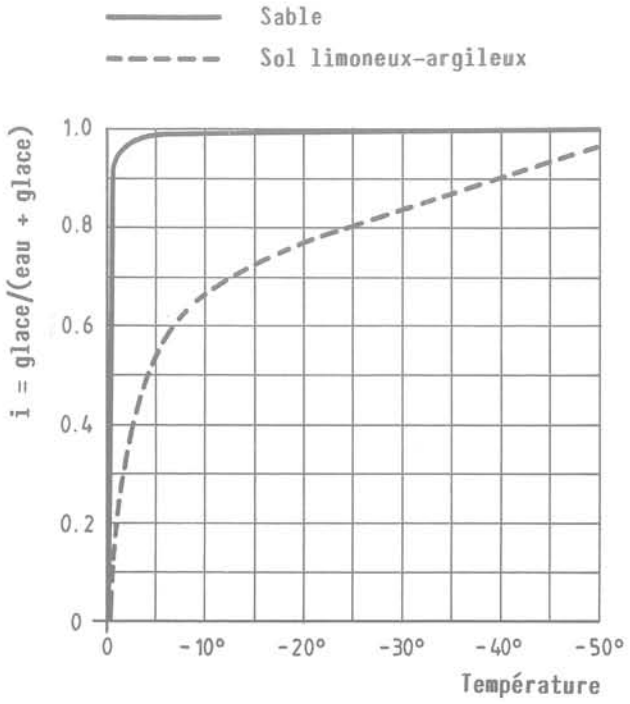


Fig. 1

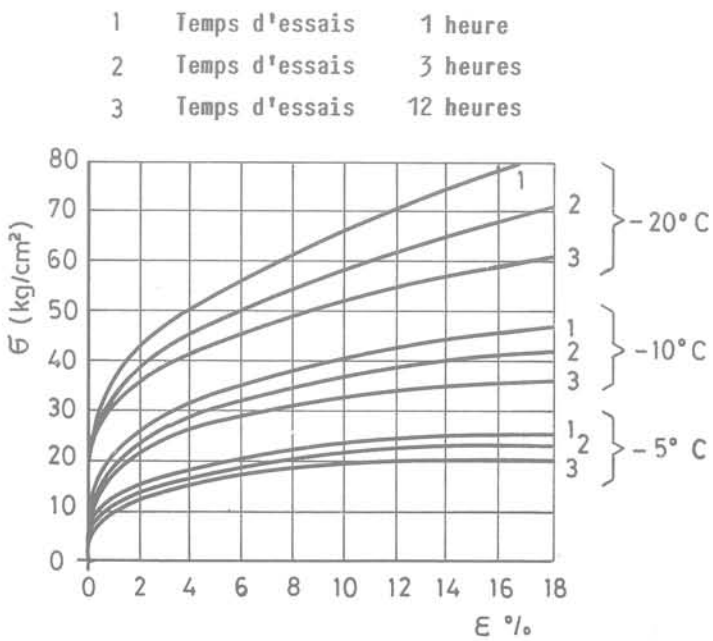


Fig. 2

- la teneur en eau et glace;
- les modalités de congélation;
- la structure du sol congelé qui en résulte : massive (congélation rapide), cellulaire ou laminaire (congélation lente sans ou avec migration d'eau vers la source du froid);
- les niveaux des contraintes moyennes et déviatoriques;
- la vitesse de déformation.

Il est bien connu que les sols congelés ont une haute résistance instantanée, mais qu'elle se réduit dans une mesure plus ou moins notable à long terme.

Il faut donc en tenir compte pour le calcul des projets; bien qu'il ne s'agisse pas de structures permanentes, les surcharges sont toutefois appliquées pendant des temps assez longs pour rendre important le fluage.

Les données expérimentales de laboratoire montrent que, avec les mêmes modalités de congélation et d'essai, la résistance augmente en passant des argiles aux sables, à cause du pourcentage croissant d'eau transformée en glace.

La figure 3 montre la variation du pourcentage d'eau à l'état liquide en fonction de la température et du type de sol.

Dans le cas d'un sol argileux on a environ 15 % d'eau non gelée $-(10\text{-}20)$ °C tandis que l'eau est déjà pratiquement toute transformée en glace à peu de degrés au-dessous de zéro, s'il s'agit d'un sable propre.

La figure 4 montre la variation de résistance dans le temps pour deux sols typiques à 3 températures (de -5 °C à -20 °C).

Pour ce qui concerne l'influence de la teneur en eau il faut remarquer que la résistance est due en grande partie aux forces de cohésion développées entre les particules minérales et la glace.

Par conséquent la résistance augmente avec la teneur en eau, par l'agrandissement de la surface de contact entre particules et liant.

La résistance augmente aussi avec la diminution du volume des pores, car l'amincissement des films d'eau et de glace accroît la cohésion.

Les caractéristiques mécaniques des sols congelés dépendent donc d'un ensemble de facteurs plus ou moins liés entre eux.

Les effets négatifs du digel (par rapport aux caractéristiques du sol avant la congélation) peuvent être très graves dans les cas de sols à granulométrie fine, non saturés et surtout congelés lentement.

Ces problèmes se posent particulièrement pour les cycles gel-dégel naturels et ils ont été étudiés à fond par les Russes et les Canadiens.

En général les conséquences sont moins importantes dans les cas de congélation artificielle et de toute façon on peut y remédier plus facilement :

- en considérant les modifications après le dégel dans le projet des structures à réaliser au contact du sol congelé;
- avec un choix convenable de la méthode de congélation pour minimiser les modifications, lorsqu'elles peuvent avoir une influence sur la stabilité des éventuelles structures existantes (par exemple utilisation de l'azote liquide dans les cas plus délicats).

2 Principes théoriques de la congélation artificielle

Lorsqu'on a établi les caractéristiques mécaniques et les dimensions de la structure de sol congelé à obtenir, il faut analyser les liaisons entre les nombreux paramètres qui règlent le cours de la congélation.

A ce propos les données expérimentales directes ont été enrichies par une grande masse d'informations obtenues au moyen de l'instrumentation de contrôle pendant les traitements réalisés.

Mais du point de vue théorique le problème est très complexe et difficile à résoudre rigoureusement.

La recherche à ce sujet a atteint néanmoins un bon

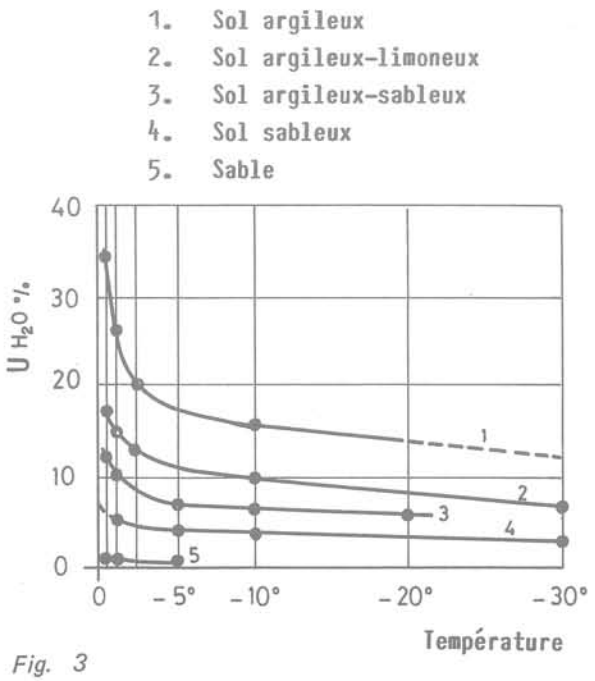


Fig. 3

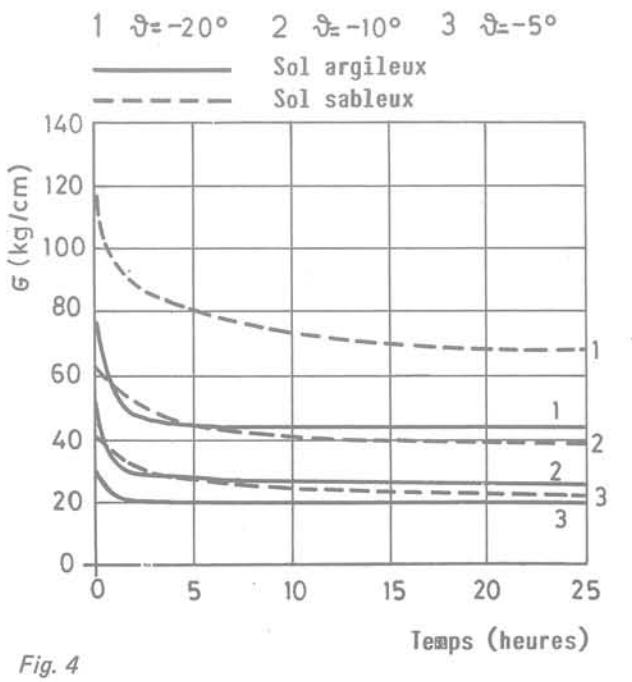


Fig. 4

niveau de précision sur la base des solutions proposées par l'école russe et en particulier par Kakhimov.

La distribution des températures pendant les phases de traitement peut être calculée approximativement avec les hypothèses simplificatrices suivantes :

- sol homogène et isotrope;
- propriétés thermophysiques constantes, avec la seule distinction entre sol congelé et non congelé (refroidi); conductibilité thermique indépendante de la température;
- point de congélation égal pour toute l'eau contenue dans le sol;
- température du fluide frigorifique constante sur toute la longueur de la sonde congélatrice;
- flux de chaleur correspondant à une succession de régimes stationnaires;
- diffusion radiale des frigories.

Étant donné les modalités technologiques du traitement, les caractéristiques de sol et la géométrie de la structure congelée conformément au projet, l'évaluation du temps de congélation est faite en deux phases successives.

Dans la première phase on calcule le temps nécessaire pour obtenir le contact entre les bulbes de sol congelé autour des sondes et après, le temps pour atteindre l'épaisseur et les limites de température (qui règlent la résistance) fixées par le projet.

2.1 Distribution des températures

La figure 5 montre les relations entre la température (U) et la distance r à partir de l'axe de la sonde congélatrice.

Les températures sont considérées comme différences relatives à la température du sol naturel, laquelle est donc $U = 0$.

U_n est le point de congélation de l'eau (autour de 0 °C pour l'eau normale).

$U_o - U_n$ est la température du fluide frigorifique au-delà du point de congélation de l'eau.

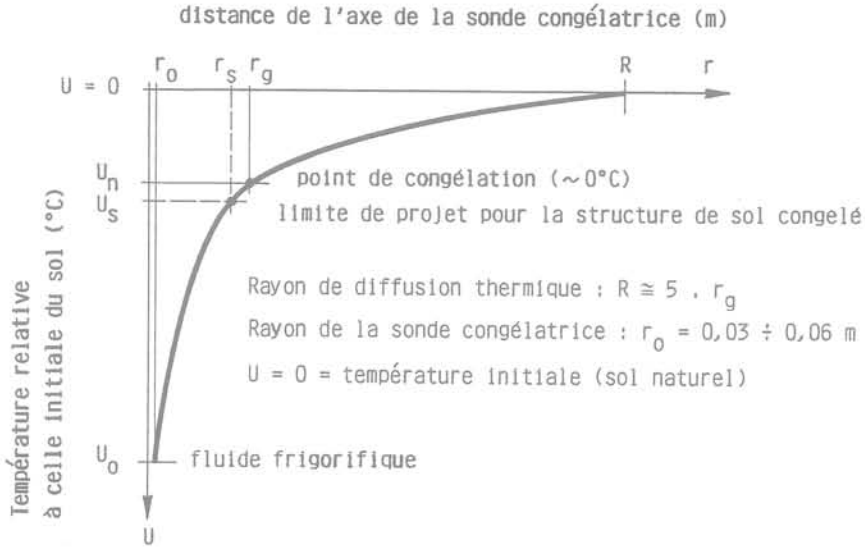
La relation (2) est valable jusqu'à la distance r_g correspondante au point de congélation U_n; r_o est le rayon de la sonde.

Entre r_g et le rayon d'influence du froid R ($U = 0$ = température initiale du sol naturel) on a la relation (3).

La distance r_s correspond à la température limite de projet U_s (un peu au-delà de celle de congélation de l'eau U_n) pour la structure utile de sol congelé.

Sur la base de résultats expérimentaux on peut considérer R/r_g compris entre 4,5 et 5,5 — donc de l'ordre de 5.

Dans la figure 6 on voit des exemples de distribution des températures T par rapport à la température du fluide frigorifique (c'est-à-dire de la sonde congélatrice) T_o pour 3 différentes valeurs de r_g (de 60 cm à 1 m) en considérant $T = 0$ la température de congélation de l'eau.



dans le sol congelé ($r_o \leq r \leq r_g$) :

$$(2) \ldots \quad U = \left[U_o - (U_o - U_n) \cdot \frac{\ln r/r_o}{\ln r_g/r_o} \right] = U_o \sim U_n$$

dans le sol refroidi ($r_g \leq r \leq R$) :

$$(3) \ldots \quad U = U_n \cdot \frac{\ln r/R}{\ln r_g/R} = U_n \sim 0$$

Fig. 5

Pour avoir une marge de 3-5 °C sous zéro, le rapport T_s/T_0 à la limite de la zone congelée utile devrait être compris entre environ 0,02 (azote liquide) et 0,13 (saumure).

La distance r_s correspondante à T_s est peu inférieure à r_g (95 %) dans le premier cas (azote liquide), diminuant autour de 70 % de r_g dans l'autre cas.

La température moyenne T_m du sol congelé entre r_0 et r_g peut être calculée par intégration comme indiqué dans la figure.

Pour r_g entre 0,6 et 1,0 m, le rapport T_m/T_0 varie entre 0,28 et 0,31 avec $r_0 = 0{,}05$ m.

En diminuant r_0 à 0,03 le champ de variation est 0,25-0,28.

Théoriquement la température moyenne du sol congelé est donc de 1/4 à 1/3 de la température de la sonde congélatrice.

Cette conclusion est valable pour la saumure, mais dans la congélation rapide à circuit ouvert on surestimerait T_m en considérant la température T_0 de l'azote liquide.

On peut avoir une bonne approximation en introduisant dans la formule (4) de la figure 6 une valeur T_0 de l'ordre de −100 °C.

2.2 Calories à prélever du sol

Au lieu de la formule complexe dérivée de la théorie de Kakhimov on présente ci-dessous une expression moins précise mais bien plus simple des calories à prélever du sol pour la congélation en kCal/m³ :

(5) $Q = [\nu_s \cdot C_t T + W \cdot \nu_s \cdot (C_w \cdot T_i + C_f + C_g T_m)]\alpha$

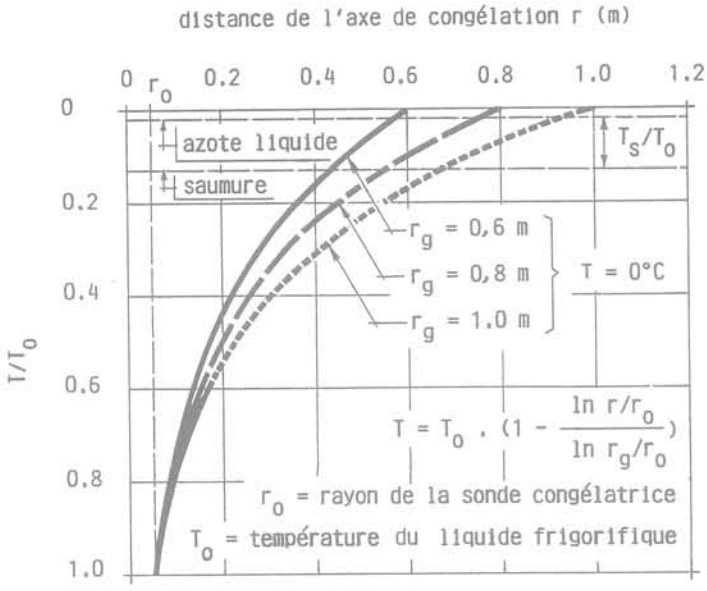
ν_s = densité sèche du sol (kg/m³);
W = teneur en eau du sol (rapport eau/sol sec en poids);
ΔT = différence entre la température initiale T_i du sol et la température moyenne du sol congelé T_m;
T_i, T_m = températures relatives au point de congélation de l'eau;
C_t = chaleur spécifique du sol sec (kCal/kg °C);
C_w = chaleur spécifique de l'eau (kCal/kg °C);
C_g = chaleur spécifique de la glace (kCal/kg °C);
C_f = chaleur de fusion de l'eau (kCal/kg);
$\alpha = 1{,}5 \sim 2$ = coefficient pratique pour tenir compte des frigories utilisées à l'extérieur du volume théorique du sol congelé.

Introduisant les valeurs indicatives des coefficients thermiques :

$C_t = 0{,}2$ $C_w = 1$ $C_g = 0{,}5$ $C_f = 80$

on obtient :

$Q/\alpha = 0{,}2\nu_s\Delta T + W\nu_s \cdot (0{,}5 \cdot T_i + 0{,}5\Delta T + 80)$



Température négative de projet à la limite de la structure congelée : $T_s = 3 \div 5$°C (demi-épaisseur $r = r_s$)

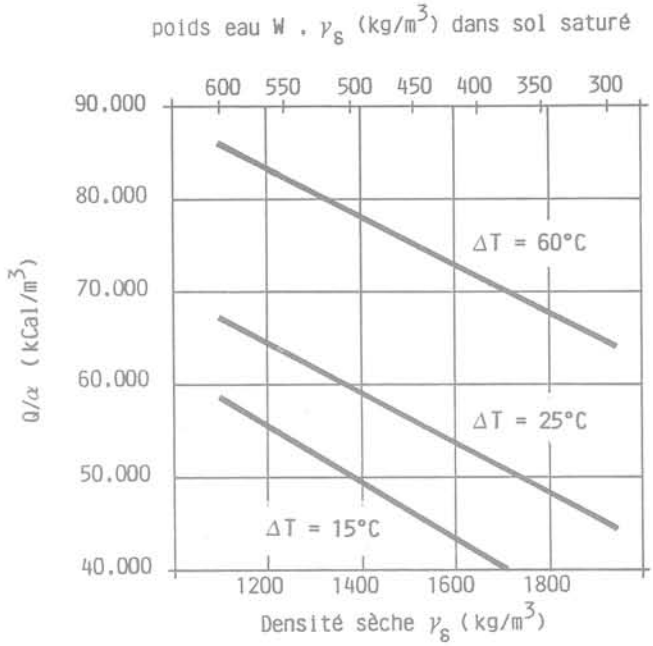
Température moyenne du sol congelé (entre T_0 et 0°C)

$$(4)\ldots\ T_m = \left[\int_{r_0}^{r_g} T \cdot dr\right] / (r_g - r_0) = \frac{T_0}{\ln r_g/r_0} \cdot \left[\frac{r_g - r_0\ (1 + \ln r_g/r_0)}{r_g - r_0}\right]$$

Avec $r_0 = 0{,}05$ m $r_g = 0{,}60 \div 1{,}00$ m :

$T_m/T_0 = 0{,}28 \sim 0{,}31$

Fig. 6



SOL SABLEUX (i = 1)

γ_{sp} = 2750 kg/m³ saturation = 100%

W . γ_s = 1000 − 0,364 γ_s

T_1 = 10°C (température initiale du sol)

Q/α = 0,2 . γ_s ΔT + (1000 − 0,364 γ_s) . (85 + 0,5 . ΔT)

ΔT = différence entre T_1 et la température moyenne du sol congelé T_m (°C)

Q = calories par m³ de sol congelé ($T = T_0 \sim 0$)

α = 1,5 ∼ 2 pour tenir compte des calories prélevées entre les isothermes 0 et T_1 (sol refroidi)

Fig. 7

La figure 7 donne des ordres de grandeur des calories Q/α pour des sols saturés avec un poids spécifique des grains égal à 2750 kg/m³, et une densité sèche variable de 1100 à 1900 kg/m³ environ.

S'agissant d'un sol saturé il y a une relation univoque entre densité sèche et teneur en eau et donc les variables se réduisent à ν_s, ΔT et T_i.

Dans le diagramme on montre les relations entre Q/α et ν_s pour $T_i = +10$ °C et ΔT entre 15 °C et 60 °C c'est-à-dire T_m entre −5 °C et −50 °C.

Ce diagramme est indicatif pour les sols sableux où on peut considérer l'eau totalement glacée ($i = 1$).

Dans le cas de sols à granulométrie plus fine il faut introduire des quantités réduites d'eau transformée en glace dans la formule (5).

2.3 Temps de congélation

La théorie de Kakhimov donne une première équation pour le temps nécessaire au contact entre les bulbes de sol congelé autour de chaque sonde.

Ce temps dépend de :

- l'écartement des sondes et leur diamètre;
- les caractéristiques volumétriques et thermiques du sol (congelé et refroidi);
- le gradient thermique fixé par le projet.

Pour calculer le temps supplémentaire nécessaire pour atteindre les dimensions finales prévues, il y a des solutions théoriques du problème en distinguant deux schémas de distribution des sondes : le long d'une ligne droite ou d'un cercle.

Toutes choses égales d'ailleurs, le temps de congélation est inversement proportionnel à la température du fluide frigorifique et à la conductibilité du sol congelé (2-3 fois plus faible dans les argiles que dans les sables); par contre le temps est presque directement proportionnel au carré du rayon de congélation.

3 Géométrie des interventions

Le projet d'un traitement de congélation résulte des facteurs essentiels suivants :

a) la forme de la structure de sol résistante ou étanche à réaliser, compatible avec les possibilités pratiques d'intervention;
b) les caractéristiques mécaniques demandées à cette structure;
c) les températures négatives à obtenir pour satisfaire la condition b);
d) le choix des solutions techniques et technologiques plus convenables pour atteindre les températures fixées et les maintenir dans le délai nécessaire, en considérant aussi tous les effets possibles négatifs (soulèvements pendant la congélation, modifications du sol après décongélation).

Les structures de sol congelé peuvent avoir une ample variété de formes (fig. 8).

Le traitement est fait au moyen de forages équipés avec les sondes congélatrices dans lesquelles on fait circuler un fluide à basse température; par conséquent les structures réalisables sont liées aux géométries possibles de forage.

Pour le fonçage de puits on peut former des couronnes cylindriques verticales à l'extrados du volume de sol à excaver, ou des structures tronc-coniques pour protéger aussi le fond.

Pour les tunnels on montre trois solutions alternatives :

- coques avec génératrices parallèles à l'axe du tunnel, à l'extrados immédiat du croisement pour la protection de la calotte et des pieds-droits;
- voûtes résistantes obtenues au moyen de forages verticaux ou subverticaux, à partir de la surface (structure « à cabane ») ou d'une petite galerie de service.

Pour l'excavation de tranchées la protection peut être faite au moyen de structures planes inclinées soudées en bas.

L'écartement des forages dépend de la nature du sol, de la méthode de congélation choisie et de la précision et fréquence des contrôles prévus (c'est-à-dire de la marge de sécurité qu'on veut garantir).

En principe l'écartement varie entre 50-60 cm dans les argiles et 70-80 cm dans les sables et graviers pour la méthode directe à l'azote liquide.

Dans les mêmes types de sol les sondes peuvent être un peu plus espacées (de 60 ~ 80 à 80 ~ 100 cm) en utilisant la méthode indirecte.

Les écartements dérivés des calculs théoriques sont très près des limites de sécurité surtout pour les sols à granulométrie fine; donc on peut les adopter seulement à condition d'un contrôle très précis et détaillé de toutes les déviations possibles des trous et anomalies dans la distribution des températures.

Ceci est en général le critère suivi par les Russes, mais nous avons vérifié qu'il est plus convenable, au point de vue technique et économique, d'augmenter la quantité des forages pour avoir moins de risques plutôt que de se soucier excessivement du contrôle des déviations des trous.

4 Procédés de congélation

La congélation des sols est obtenue en utilisant un fluide frigorifique le long de sondes congélatrices installées dans des trous perforés exprès, suivant la géométrie imposée par la forme et les caractéristiques mécaniques de la structure projetée.

Le choix du fluide frigorifique et donc des températures d'utilisation conduit à la définition des divers procédés de congélation que nous allons discuter maintenant.

4.1 Méthode directe

La méthode directe, soit à cycle ouvert, utilise un liquide à très basse température (azote) qui se vaporise dans les sondes et il est successivement libéré dans l'atmosphère.

L'azote à l'état liquide est transporté au chantier par des camions-citernes spéciaux, dans lesquels il est maintenu à une température de −196 °C (correspondant au passage d'état dans l'atmosphère), à une pression d'environ 5 bars.

Au chantier l'azote liquide est généralement conservé sous vide dans des réservoirs de stockage à double paroi dans lesquels il garde ses caractéristiques physiques jusqu'au moment de l'utilisation (fig. 9).

L'introduction dans le circuit est faite directement en utilisant la pression qui s'est formée dans les réservoirs

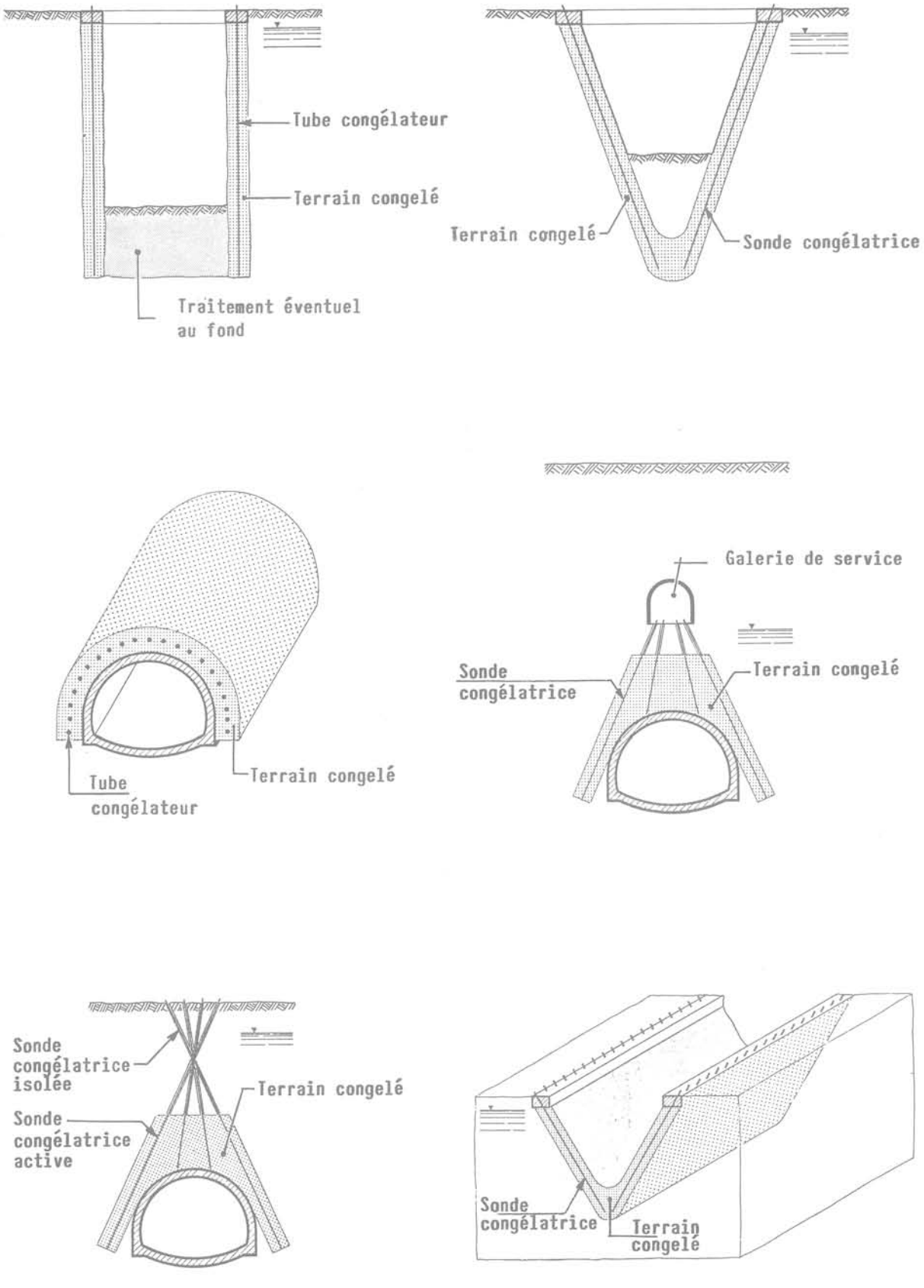

Tube congélateur
Terrain congelé
Traitement éventuel au fond
Terrain congelé
Sonde congélatrice
Tube congélateur
Terrain congelé
Galerie de service
Sonde congélatrice
Terrain congelé
Sonde congélatrice isolée
Sonde congélatrice active
Terrain congelé
Sonde congélatrice
Terrain congelé

Fig. 8

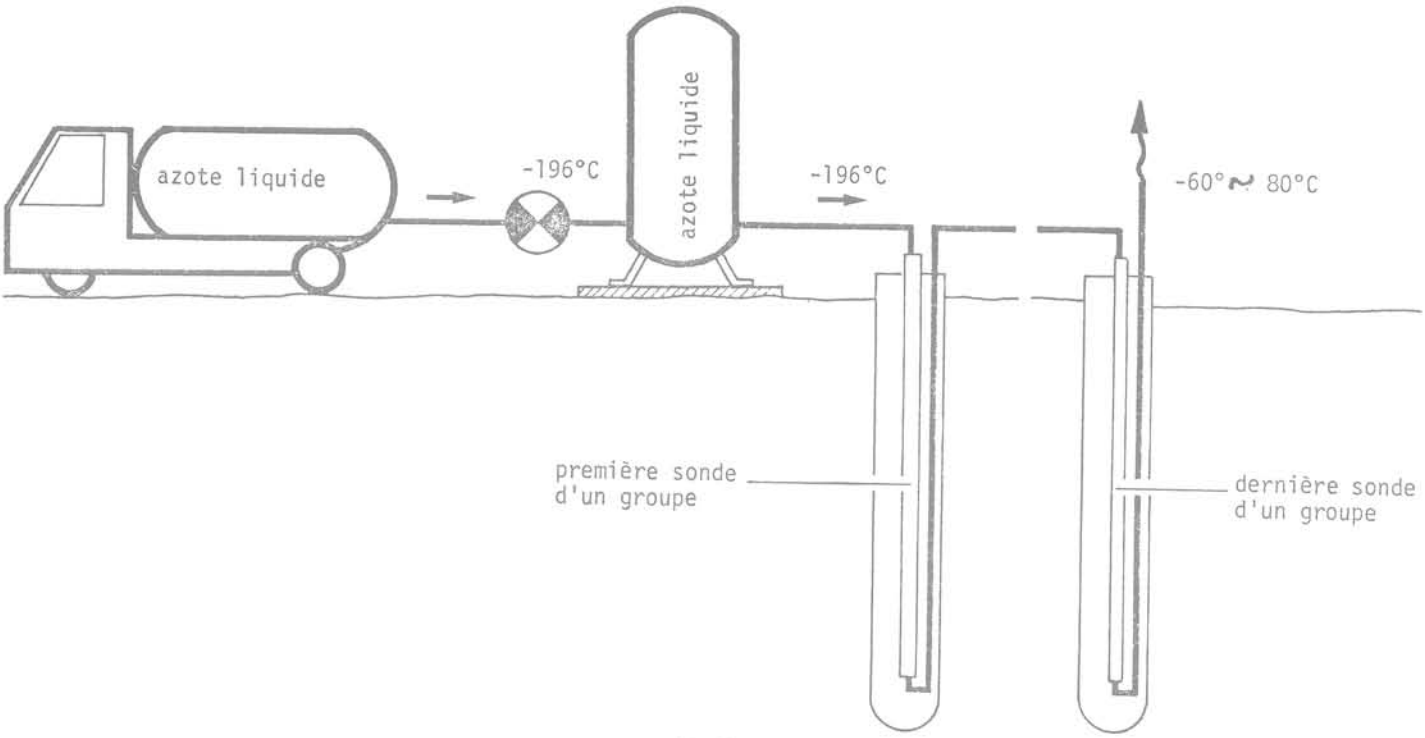

azote liquide
-196°C
azote liquide
-196°C
-60° ≈ 80°C
première sonde
d'un groupe
dernière sonde
d'un groupe

Fig. 9

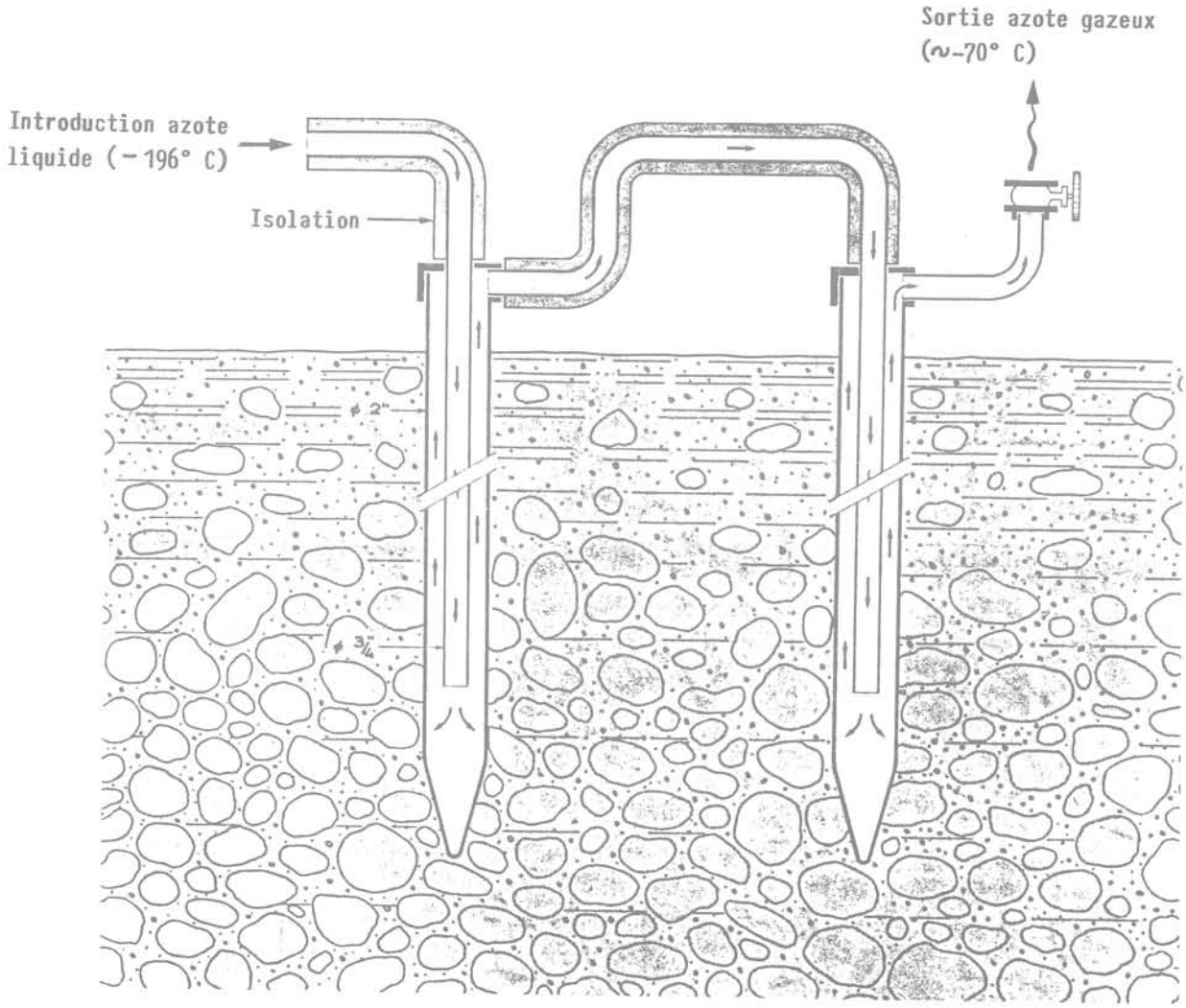

Sortie azote gazeux
(≈-70° C)
Introduction azote
liquide (-196° C)
Isolation
ϕ 2"
ϕ 3/4"

Fig. 10

et qui est réglable au moyen d'évaporateurs, à travers un tube de distribution qui transporte l'azote liquide aux sondes congélatrices. Celles-ci sont groupées et unies en séries entre elles.

A l'aval de la dernière sonde de chaque groupe il y a une vanne à travers laquelle l'azote, devenu gazeux, est libéré dans l'atmosphère.

Le rendement cryogénique d'un litre d'azote liquide est de 66 kCal, dont 39 pour la chaleur spécifique de vaporisation et 27 en ce qui concerne la chaleur absorbée du gaz entre les températures de −196 °C et −60 °C.

Pendant le passage d'état (qu'on appelle « choc thermique ») on a donc un apport de frigories égal à 60 % environ de la quantité totale.

La *sonde congélatrice* (fig. 10) est constituée par deux tubes en acier coaxiaux, connectés entre eux par une tête spéciale qui permet le passage de l'azote liquide provenant du circuit de distribution (ou de la sonde contiguë) au tube de diamètre plus petit, et l'introduction successive de l'azote qui remonte dans l'interstice entre les deux tubes, dans la sonde suivante, ou dans l'atmosphère s'il s'agit de la sonde terminale d'un groupe.

Le type et l'épaisseur des matériels utilisés sont aptes à résister aux très basses températures de régime.

Les raccords doivent être exécutés avec un soin particulier parce que des fuites éventuelles d'azote à travers les filetages entraîneraient un bouleversement important de la structure du sol autour du tube congélateur; en effet il faut remarquer qu'au changement d'état il y a une augmentation volumétrique d'environ 700 fois.

L'introduction de l'azote liquide dans chacun des groupes disposés en parallèle est réglée par des vannes spéciales.

Le débit peut donc être modifié suivant les exigences; la pression est aussi contrôlable à l'aide de vannes placées à la sortie de chaque tube congélateur terminal.

Pour la formation correcte de la structure congelée le circuit de distribution doit être conçu de telle façon à pouvoir intervenir facilement aux points désirés.

Une grande souplesse du système est donc nécessaire afin de contrôler la distribution des frigories en fonction des lectures thermométriques.

L'isolation thermique de tous les tubes externes au volume de sol à congeler joue un rôle très important; il faut non seulement éviter la dispersion de frigories dans l'atmosphère, il est aussi nécessaire que l'azote arrive à l'état liquide jusqu'aux sections intéressées, pour en exploiter la capacité cryogénique développée au changement d'état.

Lorsque la congélation du sol est achevée, on a la phase d'entretien pour garder entre une certaine limite les températures atteintes, pendant le temps nécessaire.

Dans cette phase l'azote liquide est introduit toutes les fois que les thermomètres signalent des températures supérieures à celles établies pour avoir une marge suffisante de sécurité.

La figure 11 montre un exemple des variations de température à 50 et 70 cm de l'axe de congélation en fonction du temps, pendant la première phase (36 heures) et une phase d'entretien avec deux envois d'azote pendant une semaine.

Sur la base statistique de l'expérience la consommation d'azote liquide est de l'ordre de 1 000 à 1 200 litres/m³ de sol, pour la congélation primaire et 40 à 50 litres/m³ jour, pour l'entretien successif.

Le contrôle des températures du terrain est fait avec des couples thermoélectriques introduits à différentes profondeurs dans des forages appropriés, équipés par des tubes remplis d'un liquide incongelable aux températures atteintes.

La représentation graphique de tous les points de contrôle offre une vue d'ensemble de la consistance réelle de la structure congelée, en mettant en évidence les défaillances éventuelles et rendant donc possibles des interventions localisées afin de rétablir l'équilibre nécessaire.

Le délai pour obtenir la congélation primaire est généralement de l'ordre de 2 à 3 jours.

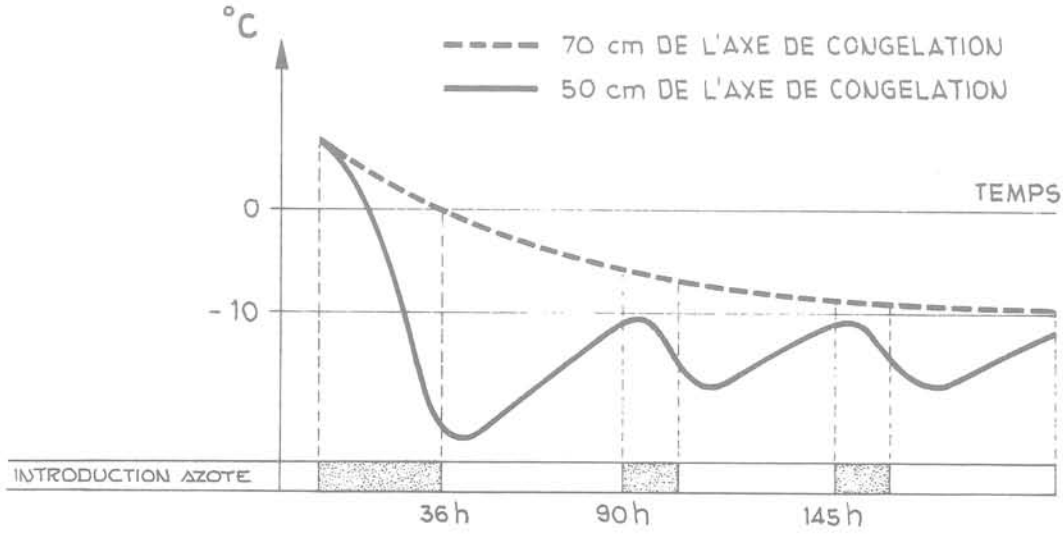


Fig. 11

4.2 Méthode indirecte

Dans la méthode indirecte la source du froid est constituée par un circuit frigorifique primaire qui, au moyen de compresseurs et condensateurs, liquéfie le fluide frigorifique qui se vaporise dans l'évaporateur en maintenant aux basses températures le liquide frigorifique qui circule dans le circuit secondaire jusqu'aux sondes congélatrices (fig. 12).

Il y a différents types de *fluides frigorifiques*, comme l'ammoniaque et le fréon et plus rarement l'anhydride carbonique.

Le *liquide frigorifique* généralement utilisé est une saumure ayant une température d'utilisation variable entre −25 °C et −30 °C (solution chlorure de calcium à point de congélation égale à −55 °C).

Une technique plus récente permet d'utiliser des températures inférieures (environ −60 °C) au moyen de liquides frigorifiques à température de solidification très basse et avec de faibles valeurs de viscosité (Terpène).

Les groupes frigorifiques, d'une puissance de l'ordre de 200 kW sont spécialement mis au point pour les travaux de congélation des sols.

Le tube congélateur est analogue à celui de l'azote liquide quant au principe de fonctionnement, avec un diamètre un peu plus grand en général.

Les tubes congélateurs sont joints entre eux en série et ils sont alimentés en parallèle par un collecteur de distribution réglé avec des vannes et prévu pour atteindre le meilleur équilibre hydraulique.

Le temps nécessaire pour la congélation est de l'ordre de 3 à 4 semaines, soit de 10 à 15 fois plus long par rapport à la méthode directe.

La fréquence des lectures thermométriques peut être réduite, à cause de la vitesse de congélation inférieure.

La figure 13 montre le déplacement dans le temps de l'isotherme −3 °C à partir de la sonde congélatrice : 10 jours pour atteindre 40 cm et un temps égal supplémentaire de 40 à 50 cm.

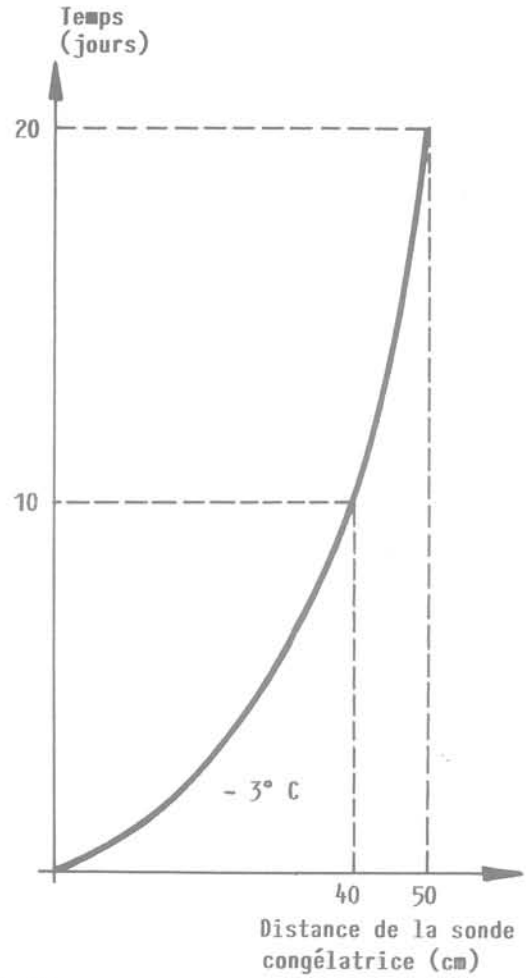


Fig. 13

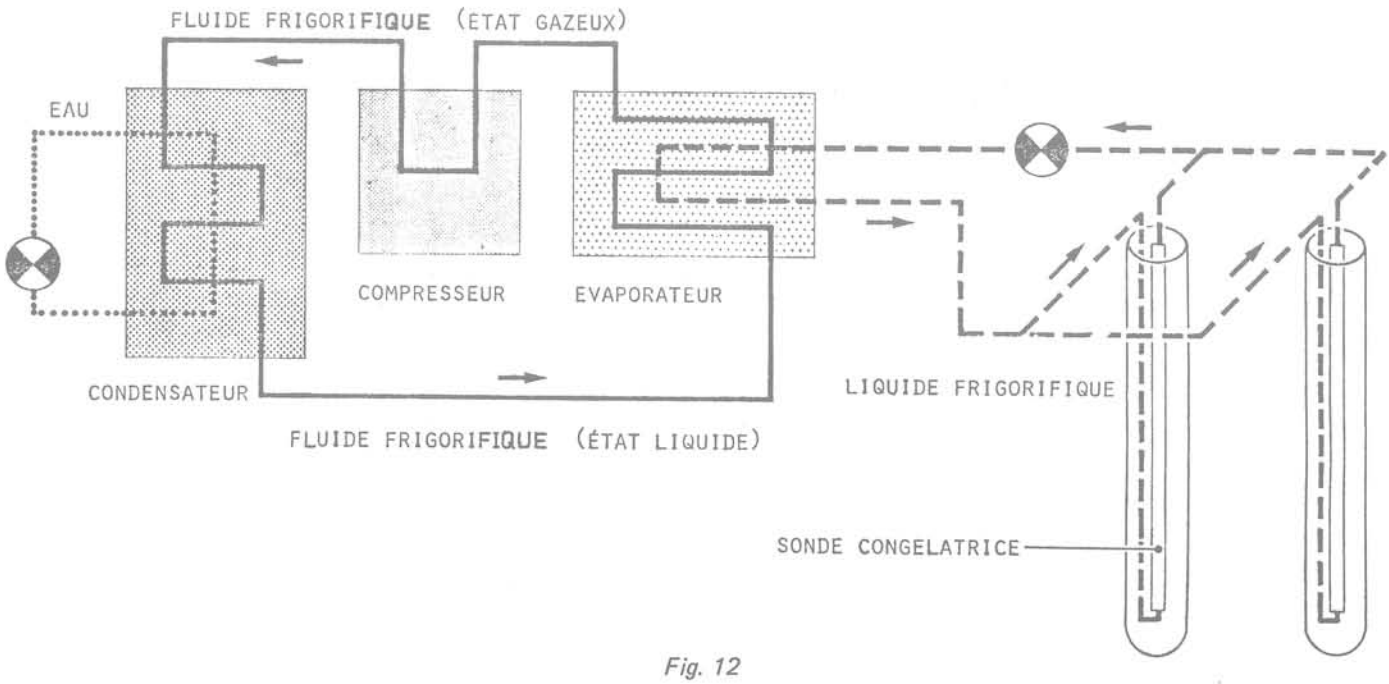


Fig. 12

Le plus faible rendement cryogénique de cette méthode par rapport à celle directe demande un très grand soin dans l'étude préliminaire du sol et dans le projet de l'installation frigorifique; les moindres erreurs peuvent entraîner les risques d'une durée plus longue du traitement ou même de l'impossibilité à atteindre les résultats prévus.

4.3 Méthode combinée

Ce système permet d'associer la grande puissance cryogénique et donc la souplesse et la sécurité de la congélation avec azote liquide, à la technique plus traditionnelle et économique des groupes frigorifiques (à la saumure).

La méthode combinée consiste essentiellement à rendre complémentaires les méthodes directe et indirecte, en utilisant les mêmes sondes congélatrices.

La technologie utilisée est donc conditionnée, quant aux matériels constituant les tubes congélateurs, par les basses températures entraînées par l'emploi de l'azote liquide; les distributions en surface sont différenciées dans les deux méthodes à cause des différentes dimensions des tubes nécessaires.

4.4 Critères de choix

Pour analyser les critères de choix il faut d'abord souligner la différence importante, en terme d'outillages, installations et main-d'œuvre, entre la méthode directe, plus simple et flexible et la méthode indirecte plus laborieuse et complexe.

Les phases principales sont constituées par l'installation et la mise en régime de la centrale frigorifique (limitée au placement des réservoirs de stockage pour l'azote liquide dans la méthode directe), par la réalisation des circuits de distribution entre la centrale et les sondes congélatrices, par la congélation primaire et l'entretien successif du sol traité.

La méthode à l'azote demande du personnel très spécialisé pour l'installation, particulièrement délicate à cause des basses températures en jeu, et des techniciens hautement qualifiés pour la définition et le contrôle des distributions différenciées du fluide dans les divers groupes de sondes en fonction des températures progressivement enregistrées.

Par contre la méthode indirecte demande plus de spécialistes pour le contrôle du circuit fermé comprenant les sondes congélatrices et surtout pour l'assistance continue (24 heures sur 24) à la centrale frigorifique afin d'en garantir le meilleur fonctionnement pendant plusieurs semaines.

Dans la figure 14 on compare les ordres de grandeur en pour cent de l'incidence économique des phases principales d'une intervention hypothétique avec les deux méthodes.

On voit que le coût de l'azote liquide représente 70 % contre 15 % pour la perforation et 15 % pour les sondes et la distribution dans la méthode directe.

Avec la méthode indirecte les frais de congélation se réduisent à 40 % du coût total, tandis que l'incidence de la perforation monte à 25 % et l'autre (sonde et distribution) à 35 %.

En termes globaux la méthode ouverte a un coût majeur de 2 à 3 fois, en moyenne, mais les comparaisons économiques peuvent conduire à des conclusions très variables selon les conditions particulières de chaque chantier.

Dans la quasi-totalité des cas étudiés la méthode indirecte présentait un avantage économique, malgré les charges plus importantes en termes d'investissement, d'installation et de temps.

Du point de vue du projet, l'azote liquide donne la possibilité de conférer au sol, dans un délai très court, des hautes résistances, celles-ci étant directement proportionnelles à la température négative atteinte.

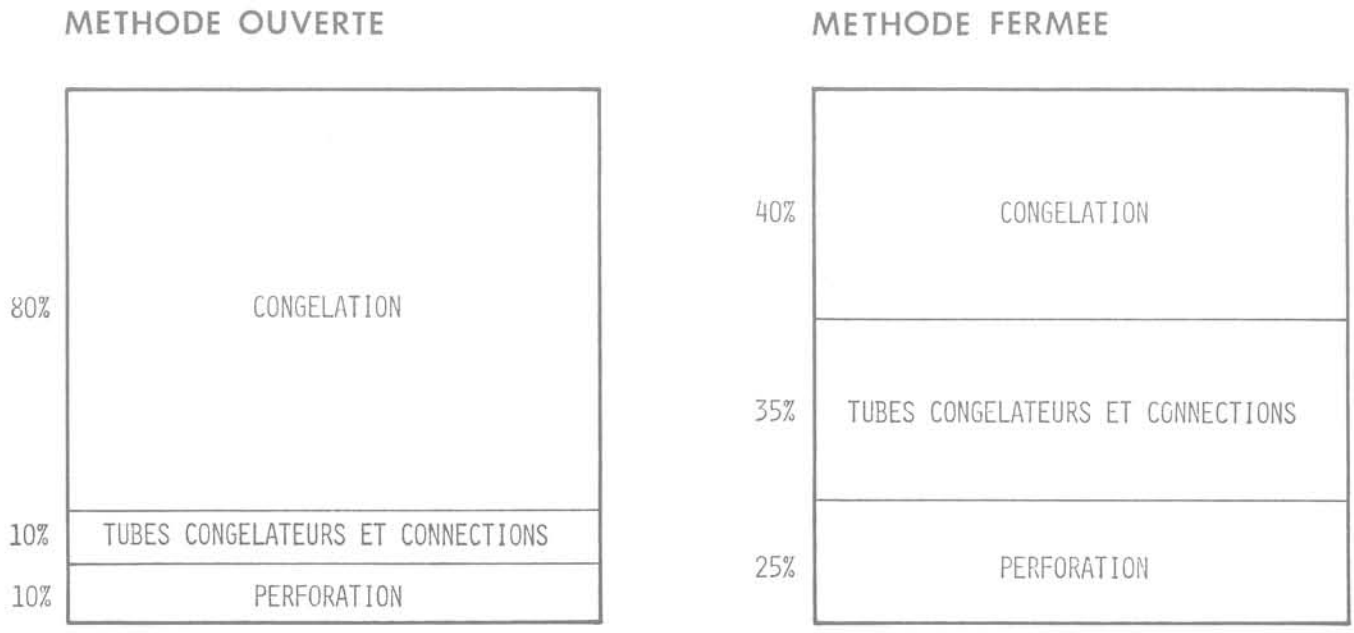


Fig. 14

Du point de vue de l'exécution la méthode à l'azote offre tous les avantages liés à la grande puissance cryogénique spécifique, qui permet le meilleur réglage du traitement en cours, limitant par conséquent les risques.

D'ailleurs le coût de ce système essentiellement déterminé par la consommation d'azote (environ 70 % du montant de l'intervention) et plus élevé par rapport à la méthode indirecte, limite en pratique son utilisation à des traitements qui exigent des temps très brefs ou qui présentent des difficultés techniques particulières.

Les difficultés peuvent dériver par exemple de la présence de courants d'eau souterrains ou de la nécessité d'intervention à l'immédiat voisinage de structures existantes.

Dans ce dernier cas la lenteur de la congélation à la saumure peut altérer sensiblement la structure des sols fins, entraîner une augmentation de volume due aussi à une progressive migration d'eau vers le front de congélation; dans quelques cas il faut aussi considérer les modifications en pis des caractéristiques mécaniques après dégel.

Par contre la congélation beaucoup plus rapide à l'azote liquide, réduit nettement ces effets négatifs.

La méthode combinée, c'est-à-dire constituée par la congélation préliminaire à l'azote liquide et l'entretien successif à la saumure, peut se révéler convenable au point de vue tant technique qu'économique dans les sols difficiles où l'entretien de la congélation est prévu dans un long délai.

En ces cas, la méthode directe est plus sûre techniquement en phase de congélation primaire, tandis que l'entretien successif est plus économique s'il est fait à la saumure.

La combinaison des deux méthodes permet en outre de résoudre des problèmes imprévus dans les meilleures conditions techniques et économiques, soit lorsqu'il y a des doutes en phase de projet sur la structure et les caractéristiques hydrogéologiques du sol à congeler.

En pratique la méthode combinée peut rendre possible, si nécessaire, des interventions ponctuelles à l'azote liquide dans un traitement projeté à la saumure.

5 Exemples d'application

La technique de la congélation a été utilisée dans presque tous les pays de l'Europe Occidentale; parmi les exemples plus remarquables on rappelle les interventions parfois de grande importance et difficulté pour le creusement de tunnels métropolitains à Paris, Stuttgart, Essen, Francfort, Londres, Oslo, Helsinki, Zurich, Bruxelles et Barcelone.

Dans les pays socialistes et surtout en Union soviétique, où la recherche théorique et expérimentale s'est amplement développée depuis la dernière guerre mondiale, des grands travaux de congélation ont été réalisés par exemple pour le métro de Moscou, Kiev, Leningrad, etc.; et pour la construction d'ouvrages hydrauliques, fondations et galeries minières.

Au Japon dans les derniers vingt ans on a fait plus d'une centaine d'applications; sont particulièrement dignes de remarque les travaux exécutés entre 1975 et 1979 pour permettre la construction de six galeries sous-fluviales à Tokyo (congélation indirecte de 37 000 m^3 de sol au moyen de 11 600 m de forages équipés).

En Italie le premier exemple de congélation à grande échelle est donné par les interventions à l'azote liquide sur un chantier de l'autoroute du Brennero dans les années 1970-71.

Le but était l'exécution de 7 puits descendant de 12 à 17 m sous la nappe pour la fondation directe des piles d'un viaduc pour la traversée du lac de Fortezza.

Les structures de sol congelé avaient des formes elliptiques ou circulaires de diamètres variables entre 5,5 et 10 m obtenues par perforation verticale jusqu'à 13-19 m de profondeur.

Les phases typiques de travail sont illustrées par la figure 15. La figure en bas montre une vue planimétrique de la distribution des forages pour le cas des piles elliptiques.

Au total on a fait 10 000 m de perforation et utilisé 6 000 m^3 d'azote liquide.

Le cliché 16 est une vue panoramique du remblai autour d'un puits circulaire en cours d'excavation.

Le cliché 17 montre les parois de sol congelé dans un puits elliptique.

Le cliché 18 montre le circuit de distribution autour d'un puits et l'azote gazeux libéré dans l'atmosphère.

Dans l'année suivante (1972) on a fait une application typique de la méthode combinée (azote liquide + saumure) à Abbadia Lariana sur le lac de Como, pour permettre la fondation par puits d'une monopile de 10 m de diamètre, jusqu'à 27 m sous le niveau du lac (fig. 19).

Le sol était constitué par des éboulis de pente, dans une matrice très fine, sur un rocher calcaire fortement fracturé et avec des pentes très remarquables.

Pour permettre l'excavation en toute sécurité il était nécessaire de réaliser une structure cylindrique de sol consolidé apte à garantir l'étanchement absolu et une résistance homogène très élevée.

Le but a été atteint par injection préalable pour intéresser les discontinuités les plus importantes, par congélation à l'azote liquide afin de réaliser une coque résistante dans la zone détritique et par une congélation plus faible, à la saumure, pour l'étanchement du calcaire et l'entretien de la structure de sol congelé pendant l'excavation.

L'étanchement du fond a été obtenu au moyen d'injection à base de résines phénoliques en cours de travail.

La consolidation définitive a été faite à la fin du bétonnage de la fondation, en injectant des coulis à base de ciment dans les fissures préalablement libérées des matériaux limoneux-argileux qui les remplissaient, par des lavages à l'air et à l'eau sous pression.

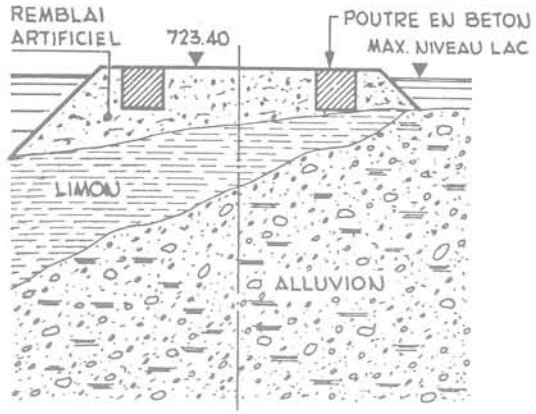
Voici quelques chiffres sur les travaux exécutés :

- 1 800 m de perforation équipée pour la congélation;
- 1 300 m^3 d'azote liquide utilisé;
- 4 mois de congélation et entretien à la saumure.

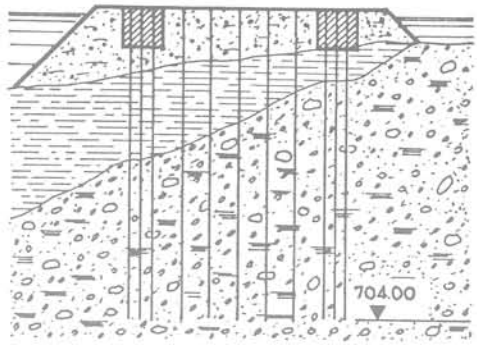
Sur les clichés 20 et 21, on montre le circuit de distribution et la paroi de sol congelé après l'excavation.

Au chantier de Santomarco, en 1973-74, le creusement du tunnel de chemin de fer à double voie Paola-Cosenza (Italie du Sud) en cours d'exécution par la

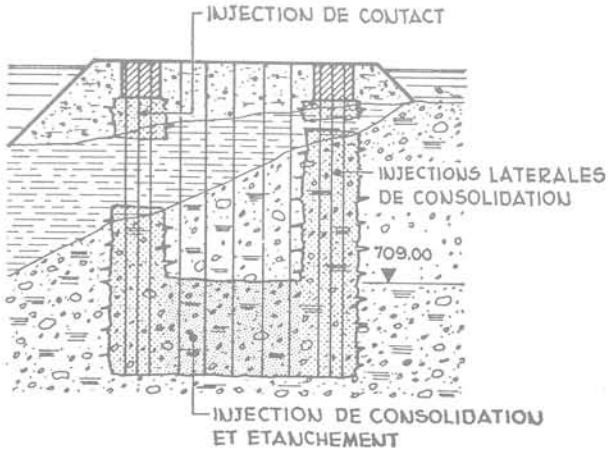
I^e PHASE - EXECUTION PLAN DE TRAVAIL



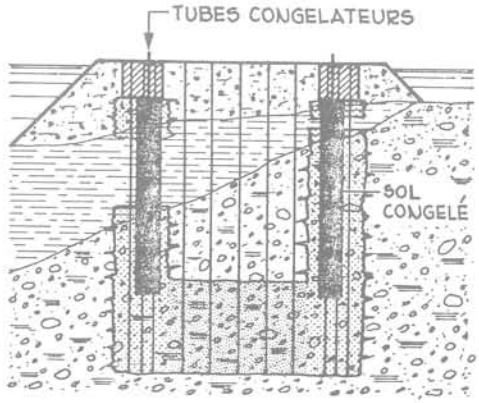
II^e PHASE - PERFORATION INJECTION



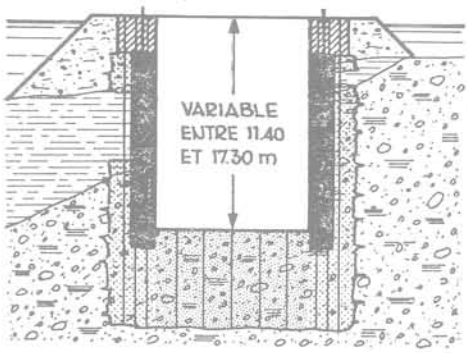
III^e PHASE - INJECTION



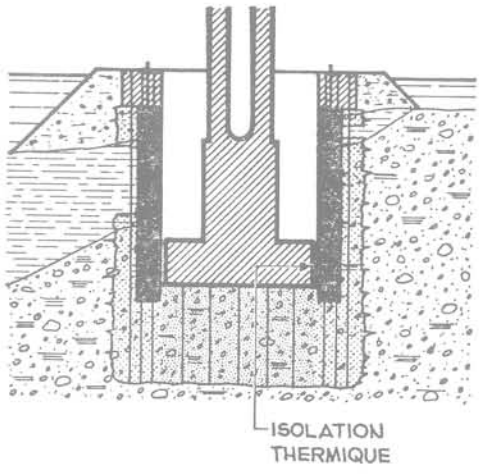
IV^e PHASE - CONGELATION



V^e PHASE - EXCAVATION (entretien)



VI^e PHASE - BETONNAGE



PLAN

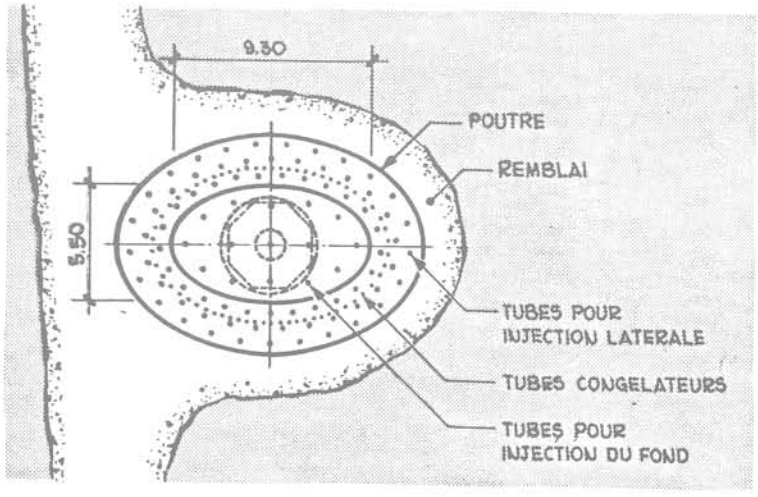
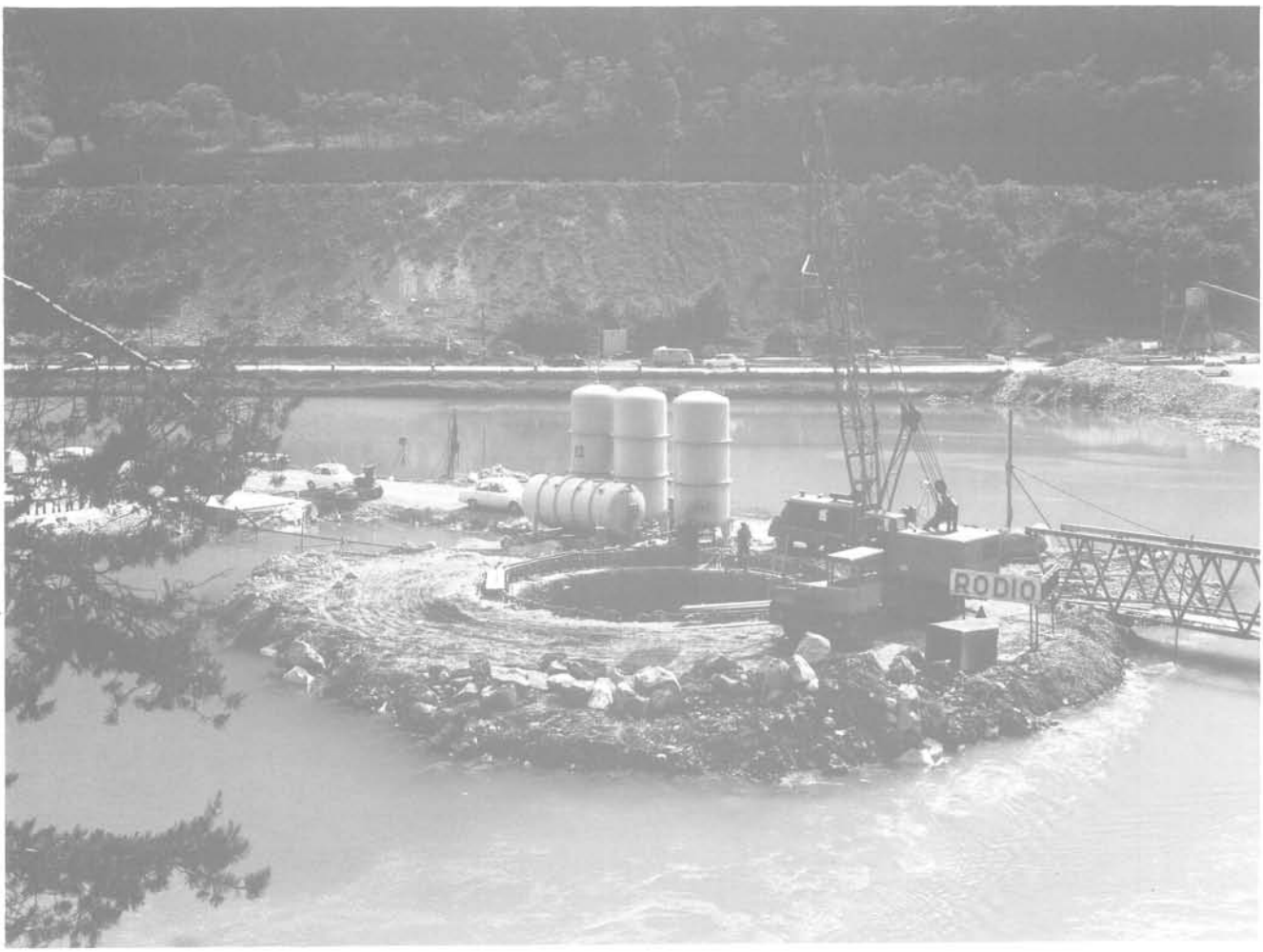
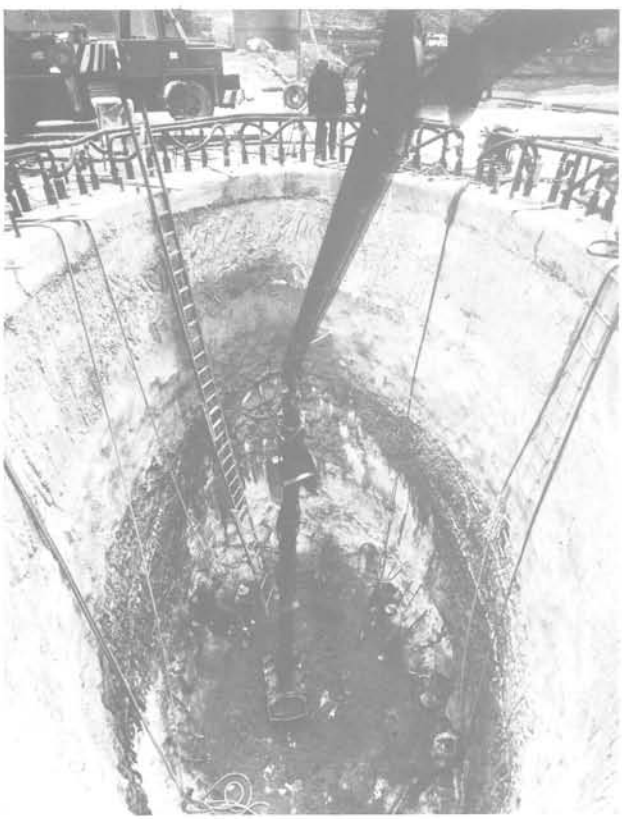


Fig. 15



Cliché 16



Cliché 17

Cliché 18

Cliché 20

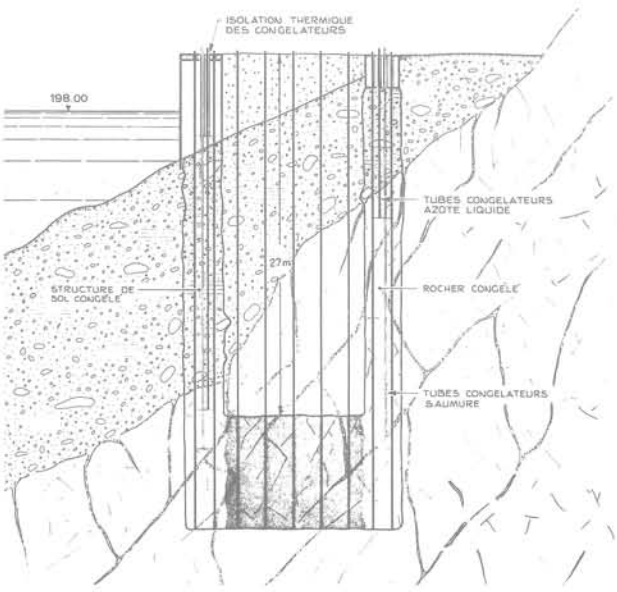
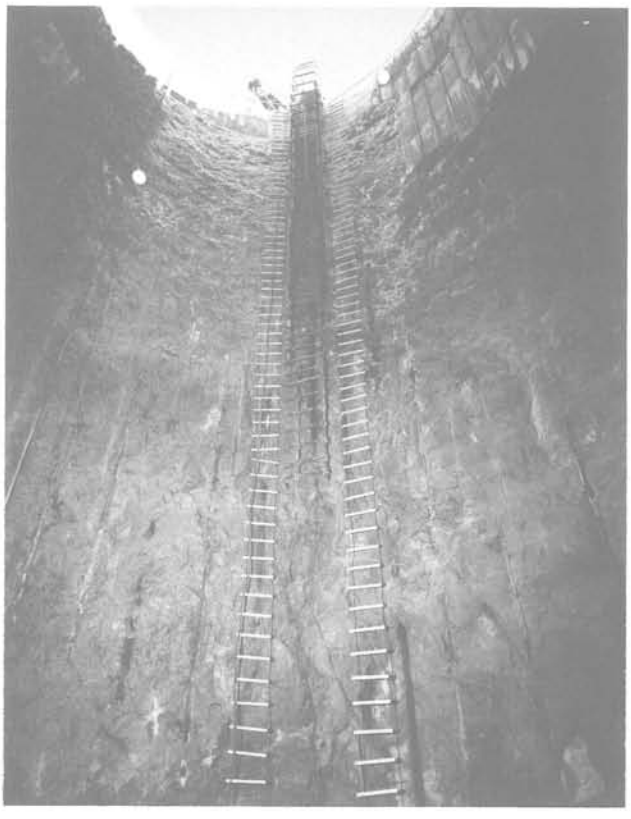
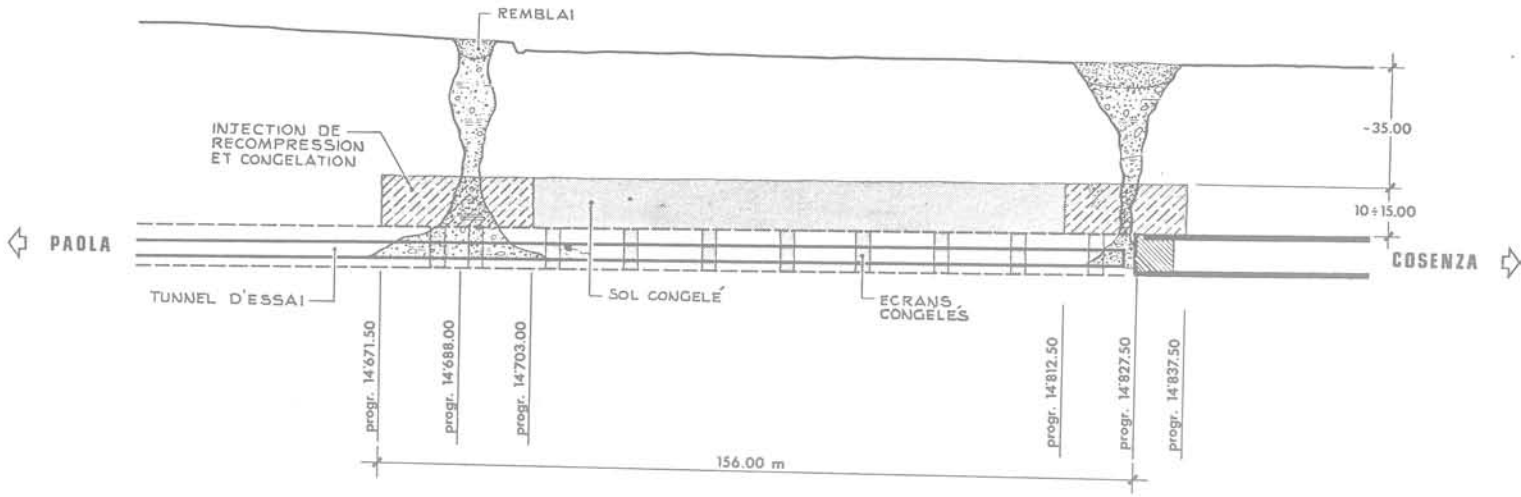


Fig. 19



Cliché 21



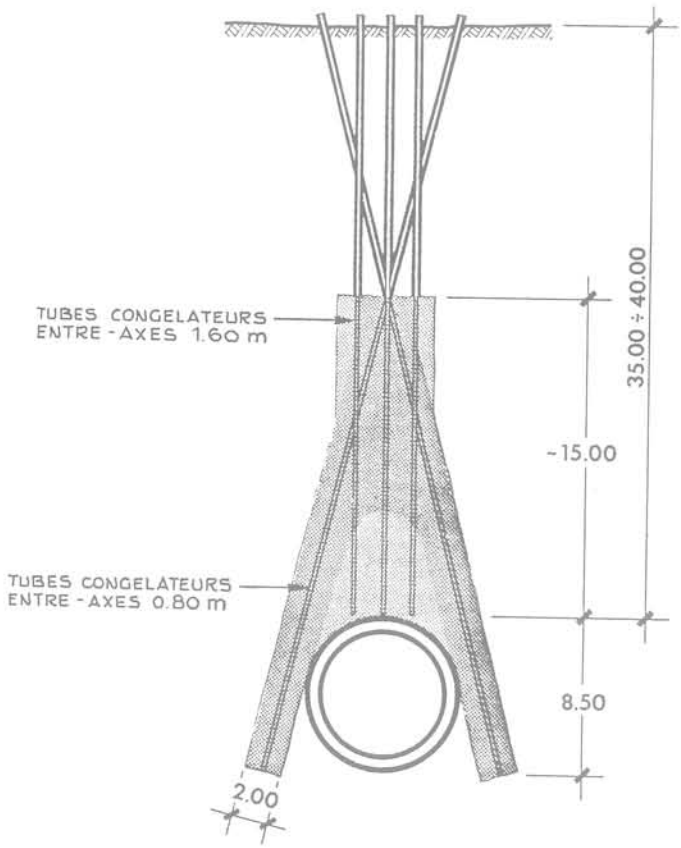


Fig. 22 Santomarco III
Tunnel ferroviaire Paola-Cosenza

méthode du bouclier à pleine section circulaire de 8,5 m de diamètre a dû être arrêté à cause de refoulements importants de limon sableux semi-fluide qui ont provoqué deux grandes « cheminées » (fig. 22).

Afin de poursuivre le creusement en sécurité avec un avancement du bouclier de 2,4 m/jour, on a proposé et réalisé une congélation à la saumure, précédée par un compactage du sol bouleversé, au moyen d'injection à claquage.

Le schéma d'intervention consistait à former une structure portante, « à cabane » obtenue au moyen de deux murs congelés, parallèles à l'axe du tunnel et qui se croisaient 15 m environ au-dessus de la calotte.

Cette structure a été intégrée par la congélation du volume de sol compris entre la calotte et les deux murs, au moyen d'une série de sondes congélatrices verticales plus espacées.

La longueur de tunnel traité a été de 150 m, la perforation 28 000 m, la puissance frigorifique installée 750 kW pour un délai de 5 mois.

Des interventions analogues ont été faites en 1974-75 à Messine, où le creusement de deux tunnels autoroutiers parallèles dans des silts marno-argileux meubles a dû être interrompu à cause d'éboulements importants à l'avancement.

Pour le tunnel droit (fig. 23), on a congelé à la saumure pour obtenir une structure de sol résistante à l'extrados des zones de calotte et pieds-droits au moyen de perforations verticales et inclinées de longueur comprise entre 20 et 30 m, sur 74 m de tunnel.

Au tunnel gauche la congélation a permis d'obtenir une coque de sol résistant et étanche au moyen de perforations subhorizontales à « parapluie » à partir de deux fronts d'avancement (fig. 24).

La longueur moyenne des perforations a été de 23 m sur 35 m de galerie.

Sur les clichés suivants, on voit la distribution des sondes congélatrices pour le traitement sub-vertical du tunnel droit (cliché 25) et le traitement subhorizontal du tunnel gauche (cliché 26).

La puissance frigorifique installée était de 360 kW (2 groupes). La perforation a atteint un total d'environ 10 000 m.

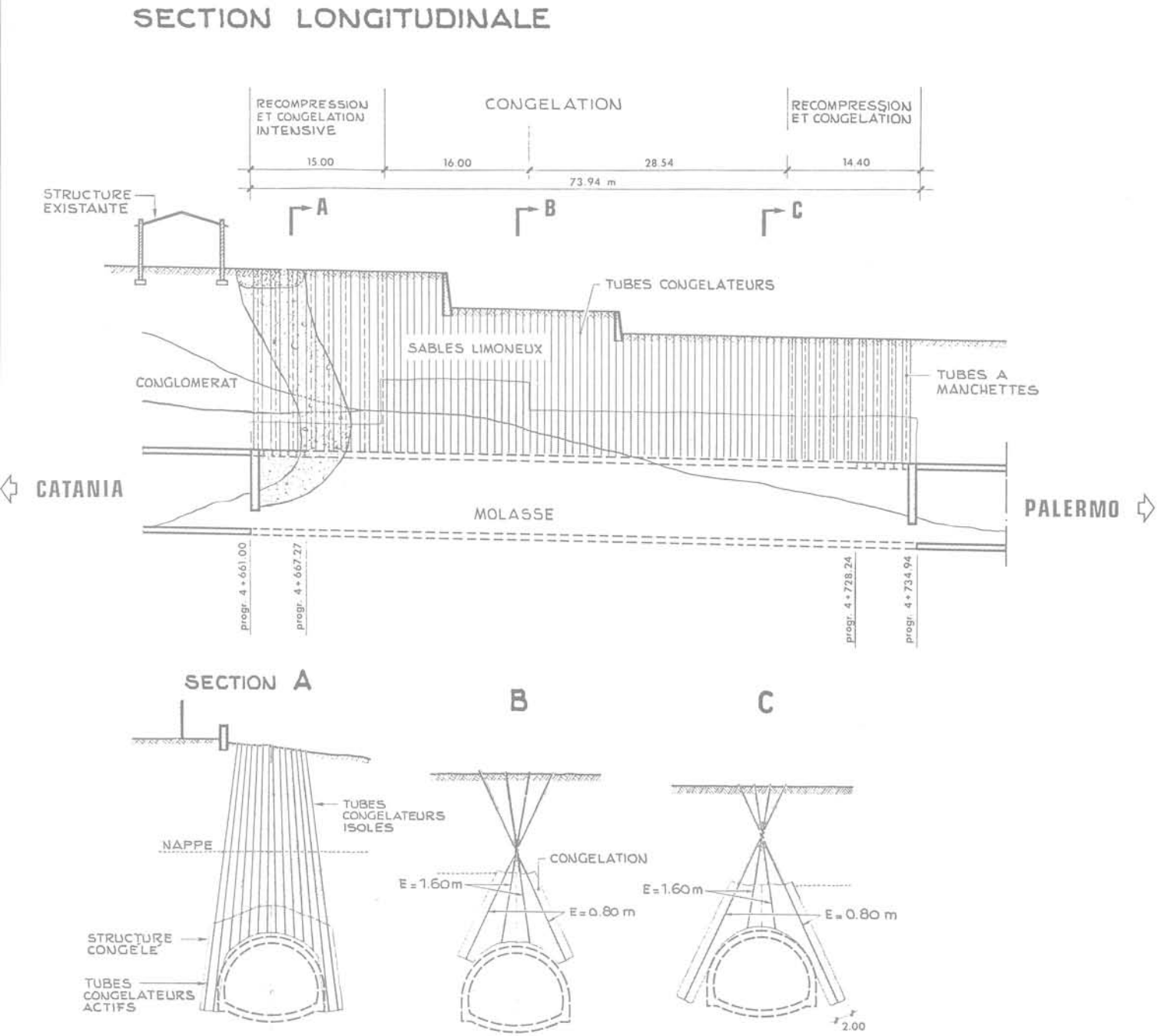
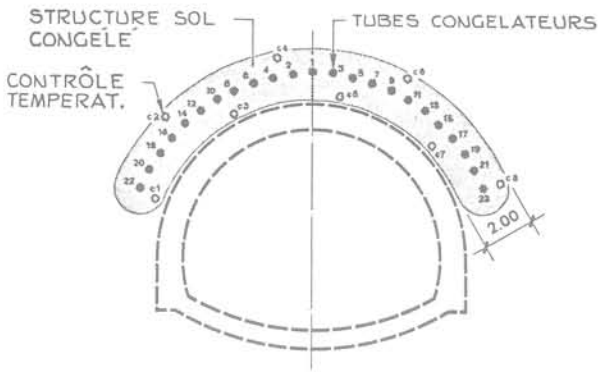
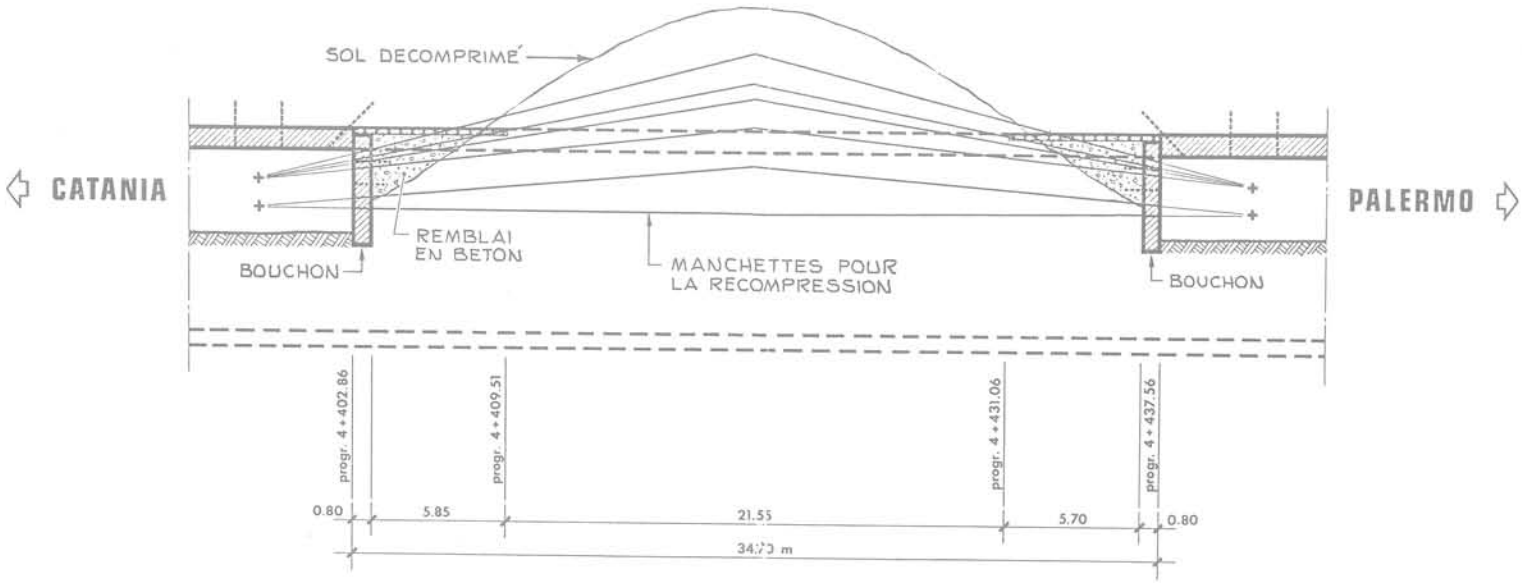


Fig. 23 Messina
Tunnel S. Giovanni (droit) (autoroute Catania-Palermo)



COUPE TRASVERSALE

SECTION LONGITUDINALE



PLAN

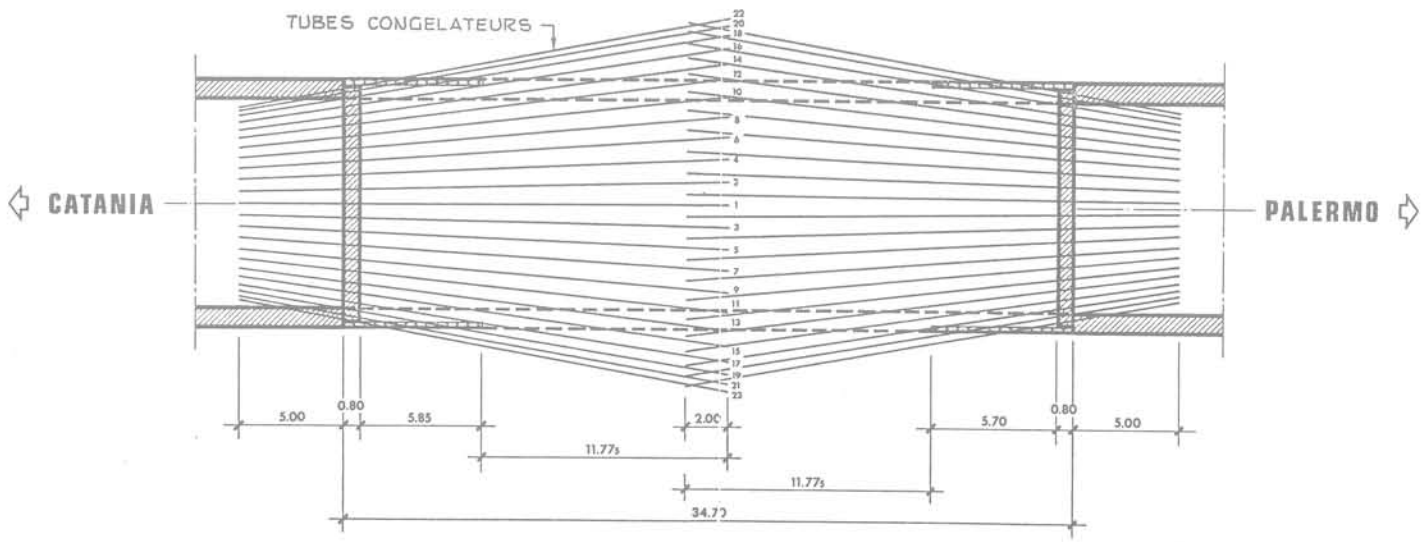


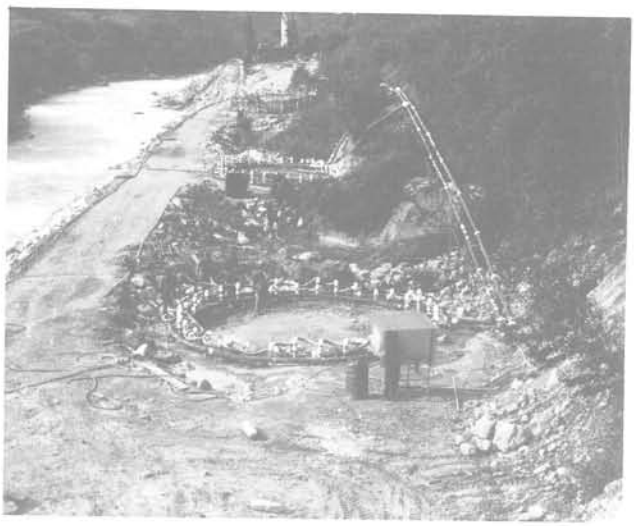
Fig. 24 Messina
Tunnel S. Giovanni (gauche) (autoroute Catania-Palermo)

Cliché 25

Cliché 26

Les travaux de congélation à la saumure exécutés en 1978-79 à Pontebba (Italie du Nord-Est) pour les fondations par puits d'un viaduc sur la route nationale Udine-Tarvisio, démontrent la sécurité de cette technique et sa réelle compétitivité par rapport à d'autres solutions alternatives.

Les puits de fondation ayant un diamètre de 7 m (fig. 27) devaient être creusés jusqu'à 16 m de profondeur dans un sol constitué par des sables, graviers et gros cailloux avec passages de sable fin limoneux.



Cliché 28

Deux solutions alternatives ont été examinées : injection de coulis à base de ciment et produits chimiques (gels de silice) ou congélation; dans les deux cas l'étanchement du fond devait être garanti par un traitement d'injection.

La solution « congélation » a été choisie car les injections auraient entraîné un coût beaucoup plus élevé et des temps d'exécution incompatibles avec le programme de l'entreprise générale.

Le traitement a intéressé un complexe de 23 piles; le cliché 28 montre une vue du chantier pendant la congélation.

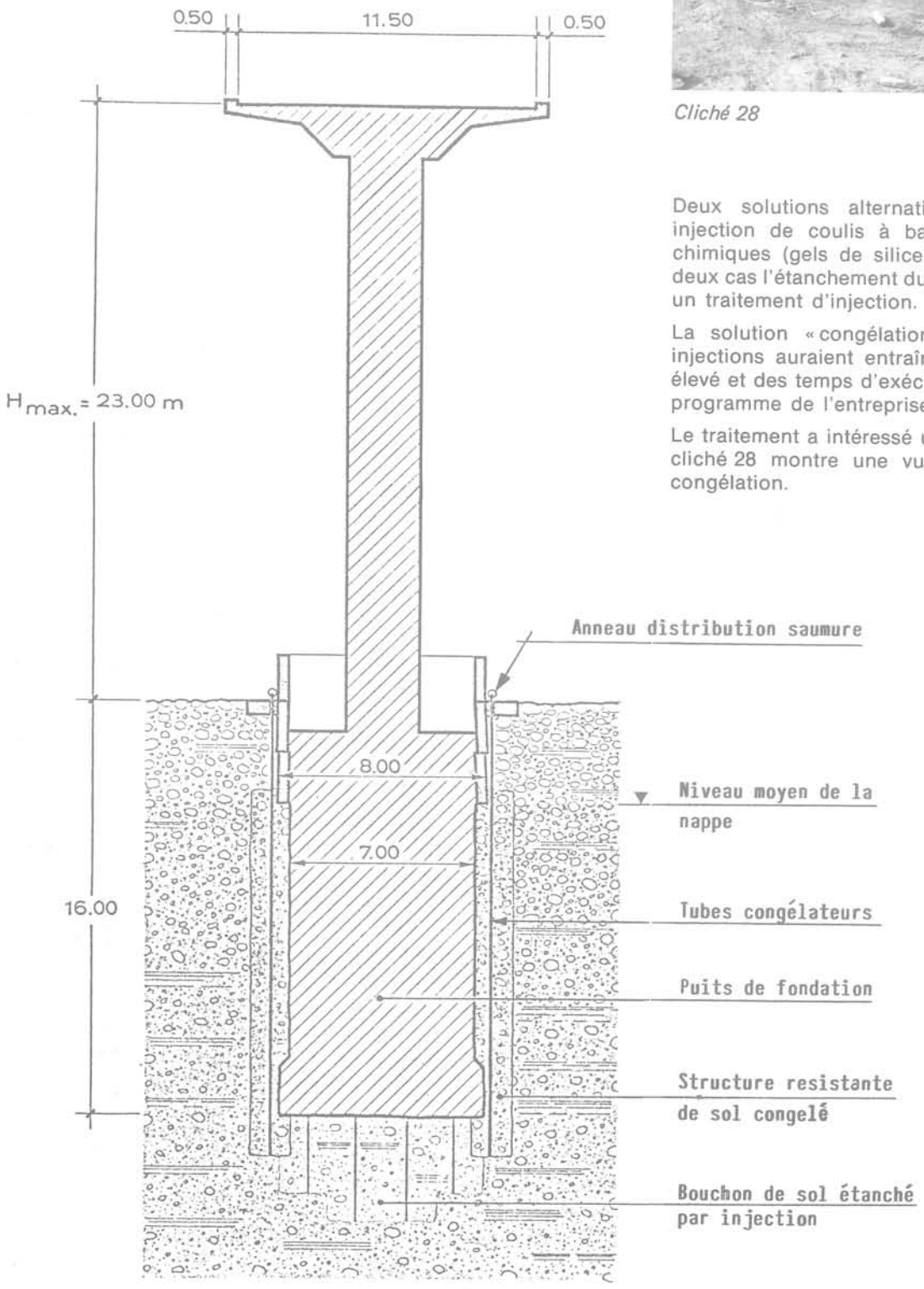
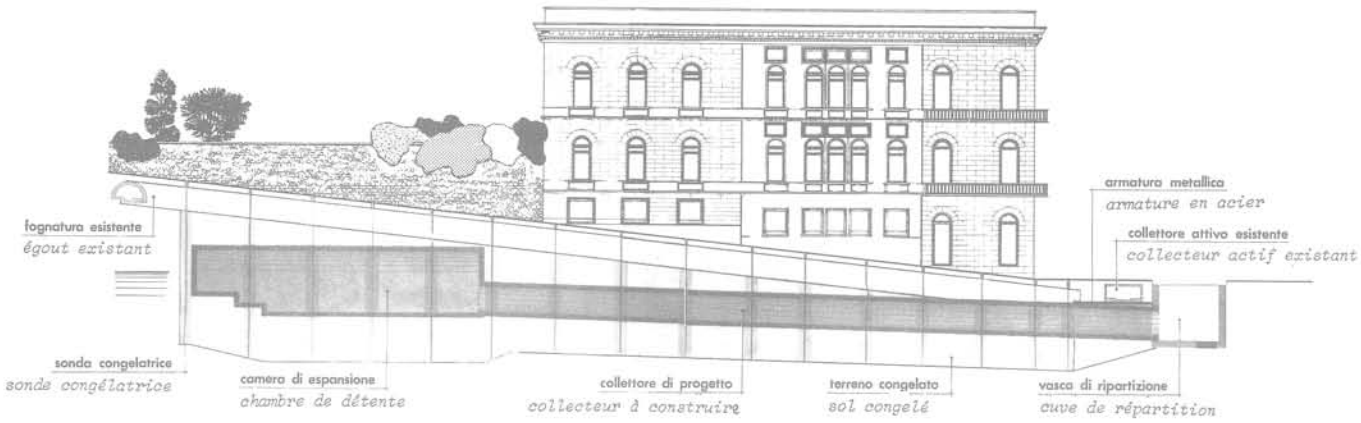


Fig. 27



sezione longitudinale
coupe longitudinale

Fig. 29

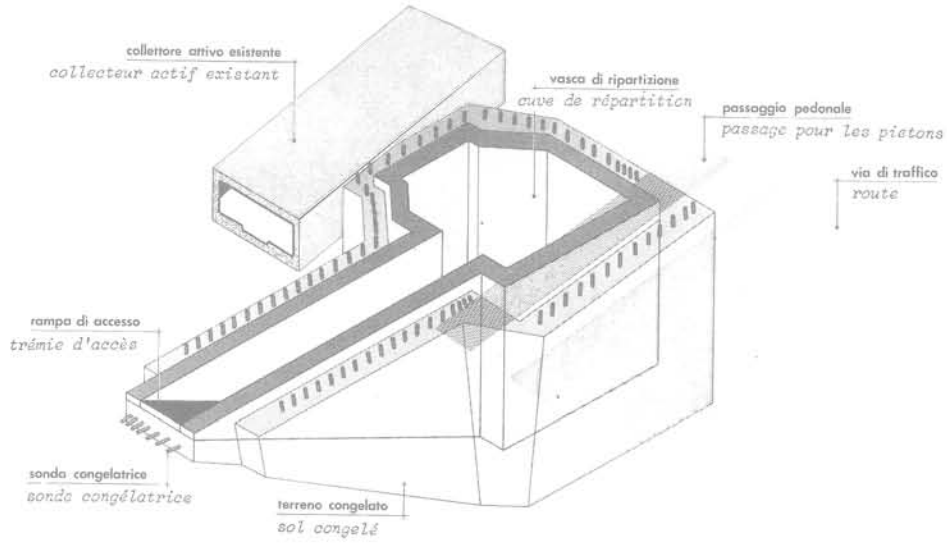


Fig. 30

Les travaux ont été exécutés en 8 mois en utilisant plus de 12 000 m de forages équipés et une puissance installée de 380 kW (environ 400 000 kCal/heure).

Les interventions faites à *Naples* entre 1978 et 1980 (Via Tasso) offrent un exemple de la remarquable souplesse de la méthode combinée.

Les ouvrages en question étaient un collecteur d'égouts de 3,40 m de diamètre, une cuve de répartition et une chambre de détente à construire au centre de la ville sous le niveau de la nappe et au voisinage immédiat de bâtiments.

Le sol était constitué par des sables plus ou moins limoneux et pouzzolanes.

La figure 29 est une vue en élévation avec une section longitudinale.

La géométrie de l'intervention pour la cuve de répartition est illustrée par les figures 30 (vue d'ensemble) et 31 (section le long de la trémie d'accès).

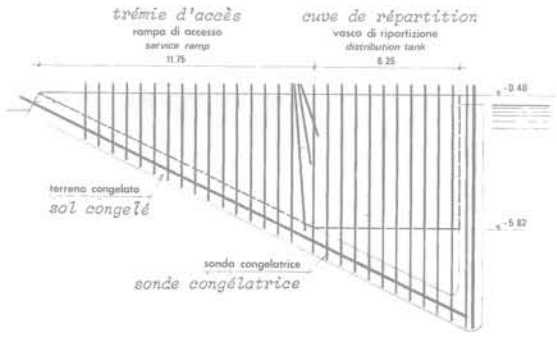


Fig. 31

Les figures 32-33 montrent le schéma d'intervention sous un collecteur actif existant, au moyen de forages sub-horizontaux à partir de la cuve et en utilisant la méthode directe à l'azote liquide pour gagner du temps, donner au sol des résistances plus élevées et en réduire le gonflement.

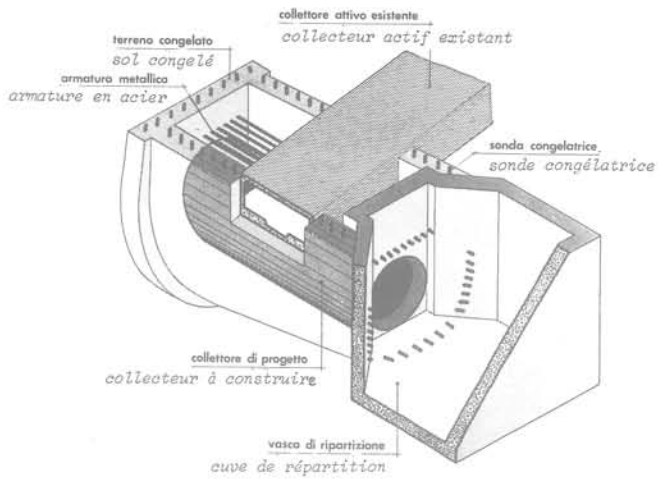


Fig. 32

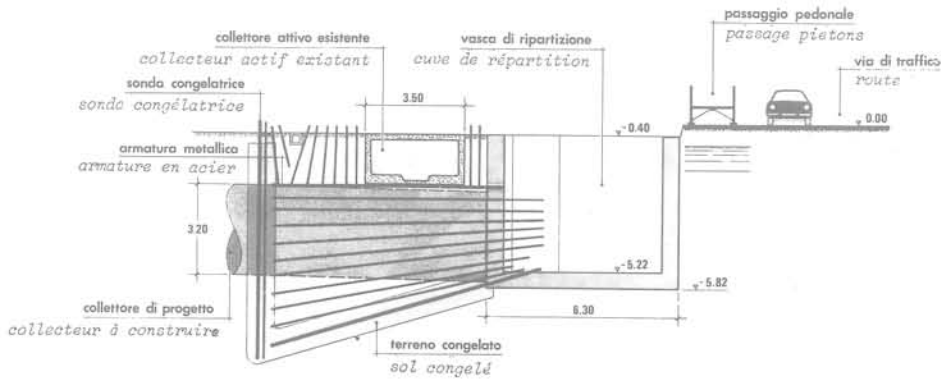


Fig. 33

Il est intéressant de remarquer que la congélation relative à la cuve, prévue à la saumure, était localement empêchée par un flux concentré d'eau provenant d'un vieux collecteur abandonné dont on ne connaissait pas l'existence.

Le problème a été résolu rapidement avec des traitements ponctuels à l'azote liquide.

Pour le tunnel et la chambre de détente on a utilisé la méthode indirecte à la saumure au moyen de forages verticaux ou sub-verticaux à partir de la surface.

Le schéma d'intervention pour le tunnel est illustré dans la figure 34 :

- deux murs résistants de sol congelé;
- injection de compactage entre le vieux collecteur et la section de creusement du nouveau;
- injection de consolidation et étanchement par coulis chimiques en dessous, entre les murs latéraux de sol congelé;
- une série de parois transversales de sol congelé pour séparer les volumes d'excavation selon le programme de revêtement du tunnel.

Un schéma analogue a été adopté pour la chambre de détente (fig. 35).

Voici quelques chiffres sur la quantité des travaux de congélation : 6 000 m de perforation, 800 m^3 d'azote liquide, un groupe frigorifique de 180 kW (200 000 kCal/heure).

La dernière application qu'on va présenter a été faite à Nice l'année passée, pour permettre le creusement d'un tunnel de 3 m de largeur, hauteur 2,6 m et 26 m de longueur, à partir d'une chambre de travail en parois moulées et descendant avec une pente de 12 % jusqu'au parking souterrain dans le complexe immobilier Nice-Étoile (fig. 36).

Le tunnel devait être réalisé en respectant un collecteur d'égout immédiatement au-dessus et le trafic de l'avenue Jean-Médecin, au cœur de la ville, avec une couverture entre 3,5 et 5 m.

Le sol, sous nappe, était constitué par une succession de limon sableux, argile et sable fin avec passages argileux.

L'impossibilité d'un traitement complet par injection a amené au choix de la congélation comme le seul moyen pour permettre l'excavation en souterrain.

Le projet a prévu la formation d'une couronne cylindrique de sol congelé autour de la section à creuser, à températures plus basses que −10 °C sur une épaisseur de 80 cm.

On a utilisé la méthode plus drastique à l'azote liquide pour des raisons techniques liées surtout à la nécessité de réduire au minimum le gonflement du sol et donc le risque de dégâts aux structures d'égout et routières.

Les forages pour la congélation et pour le contrôle des températures ont été exécutés à partir de la chambre de travail jusqu'à la paroi en béton constituant la structure d'enceinte du parking souterrain.

COLLECTEUR D'EGOUT

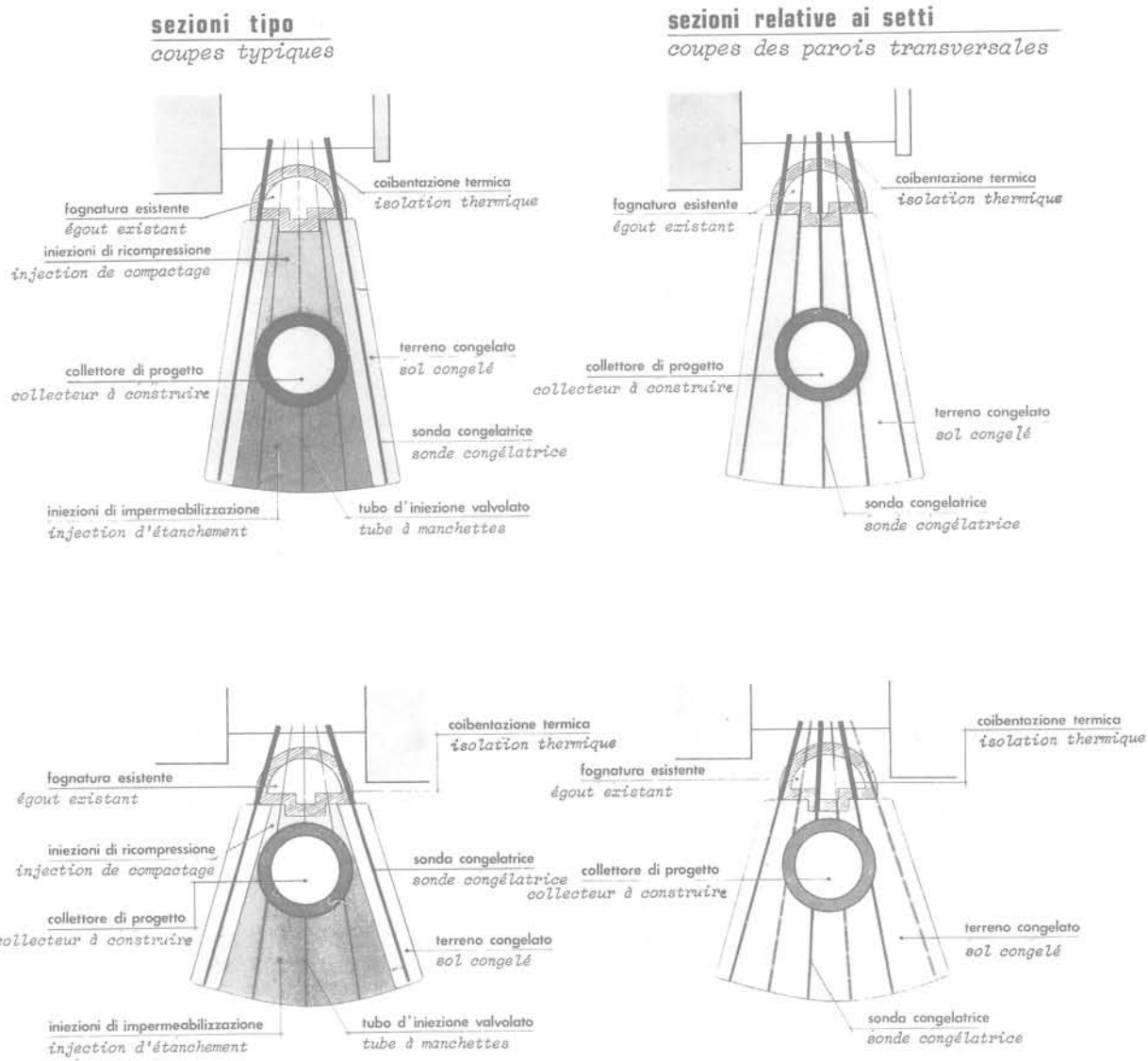


Fig. 34

CHAMBRE DE DETENTE

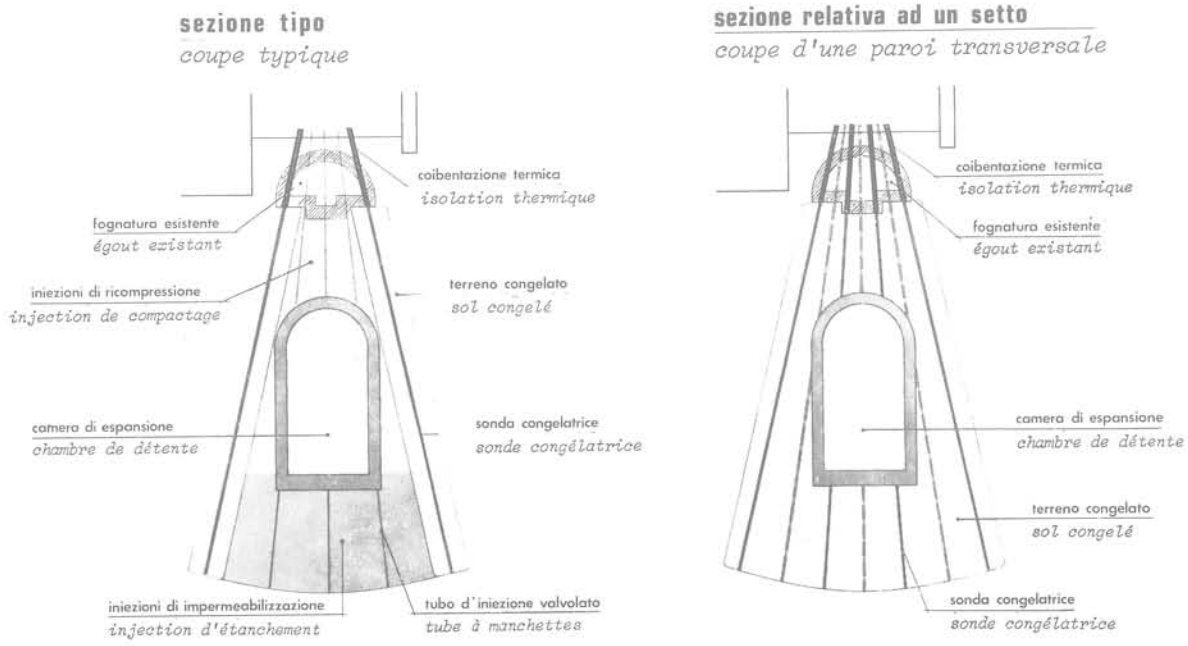


Fig. 35

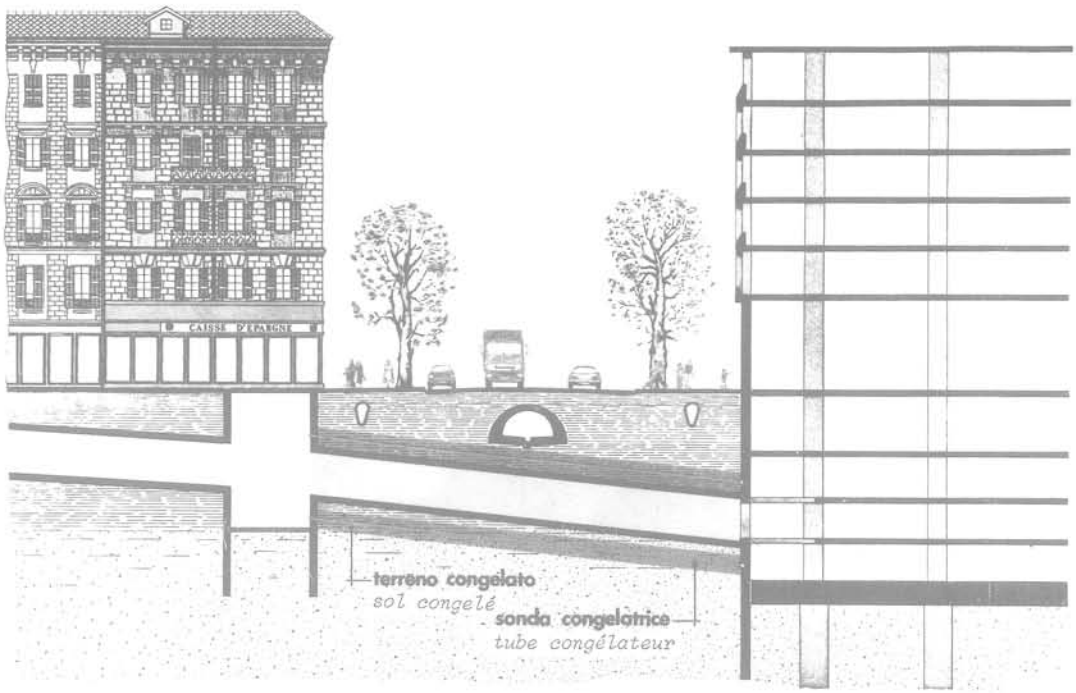
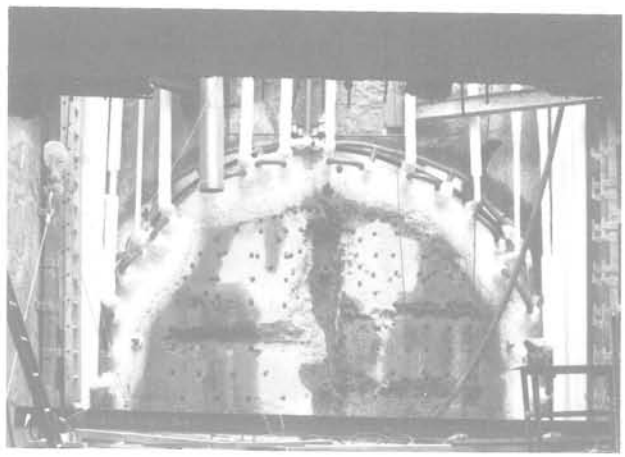


Fig. 36

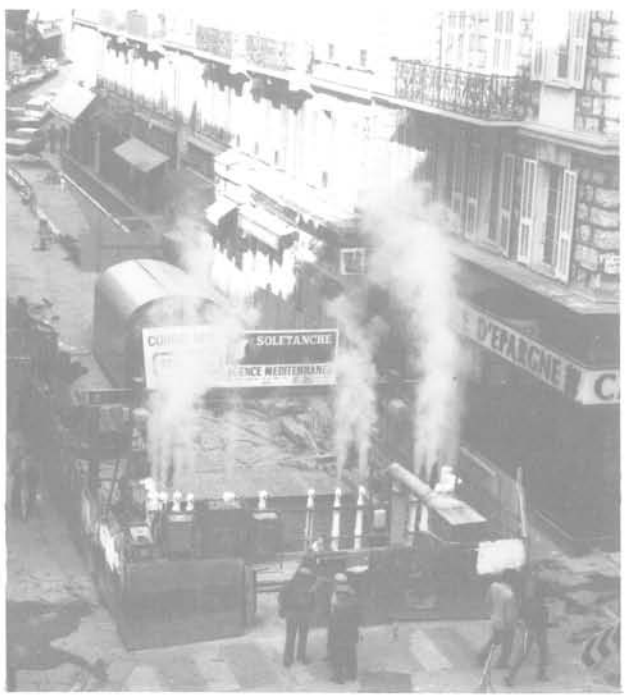
La connaissance exacte de la géométrie du traitement, permise par la vérification directe de la position des sondes congélatrices et des tubes de contrôle à l'intersection de la paroi du parking, a donné la possibilité d'étudier (avec un haut degré de prêcision) les liaisons entre les quantités d'azote et l'évolution des isothermes dans les différents types de sol.

En moyenne la condition de projet (isotherme −10 °C à 40 cm de l'axe de congélation) correspondait à une épaisseur de sol congelé d'environ 120 cm (c'est-à-dire : isotherme 0 °C à 60 cm de l'axe).

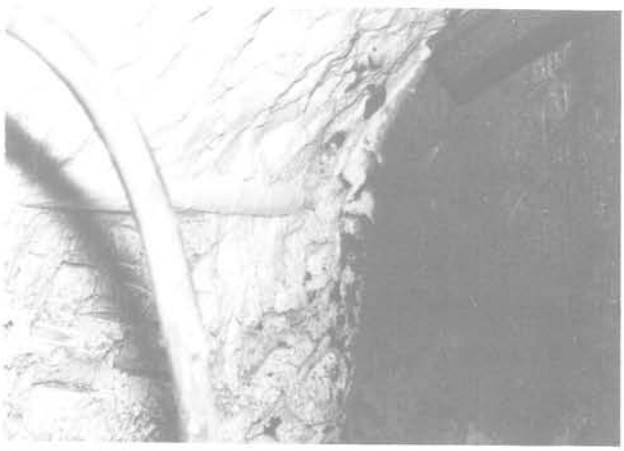
La consommation totale d'azote a été de 650 m³ pour la congélation primaire (durée 100 heures) et 880 m³ pour l'entretien pendant 35 jours d'excavation et bétonnage.



Cliché 38



Cliché 37



Cliché 39

En considérant le volume de sol au-dessous de −10 °C (anneau d'épaisseur 80 cm) la quantité d'azote est égale à 1 600 litres/m³ pour la congélation et 60 litres/m³ jour pour l'entretien.

En se référant au volume de sol au-dessous de 0 °C (épaisseur d'environ 120 cm) les chiffres susdits se réduisent respectivement à 1 000 litres/m³ et 40 litres/m³ jour environ.

Le cliché 37 présente une vue panoramique du puits pendant la congélation avec les tubes de sortie du gaz.

Sur le cliché 38, on voit les raccords entre sondes congélatrices dans la zone de calotte, avant de commencer l'excavation.

Le cliché 39 montre un détail du contact entre la structure de sol congelé (à la fin du creusement) et la paroi en béton du parking souterrain.

Références bibliographiques

BALOSSI RESTELLI A. (1971)
« Un'applicazione mista d'iniezioni e congelamento con azoto liquido sull'Autostrada del Brennero » *L'Industria delle Costruzioni*, n° 26.

BALOSSI RESTELLI A. (1973)
« La tecnica del congelamento dei terreni per risolvere un delicato problema geotecnico sulla S. S. 36 » *L'Industria delle Costruzioni*, n° 38.

BALOSSI RESTELLI A. (1975)
« Congelaciòn de los terrenos » *Materiales Maquinaria y Metodos para la Construccion*, n° 119.

BALOSSI RESTELLI A. (1980)
« Le fondazioni profonde del viadotto di Pietratagliata nella zona sismica di Pontebba » *L'Industria delle Costruzioni*, n° 109, 21-28.

BALOSSI RESTELLI A., GALLAVRESI F. (1976)
« Il congelamento del terreno ha risolto due difficili problemi di scavo in galleria » *L'Industria delle Costruzioni*, n° 57, 3-18.

BERNE' C., FIORAVANTI G., RUSSO R. (1979)
« Congelamento del terreno ed opere di sostegno per uno scavo sotto falda » *Rivista Italiana di Geotecnica*, n° 1, 19.

COMPTES RENDUS I. S. G. F. 78 (1978)
1st International Symposium on Ground Freezing, Ruhr University, Bochum, Germany.

COMPTES RENDUS I. S. G. F.'80 (1980)
2nd International Symposium on Ground Freezing, Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, Norvège.

GALLAVRESI F. (1979)
« Techniques de la congélation dans les travaux de génie civil - Utilisation de la méthode combinée azote-saumure » *Comptes rendus de la Conférence des Journées d'Étude S. I. A.* - Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, Zurich, mars 1979.

GALLAVRESI F. (1980)
« Ground Freezing - Application of the mixed method brine - liquid nitrogen » *Proc. 2nd International Symposium on Ground Freezing*, Trondheim, Norvège.

GALLAVRESI F. (1981)
« Tecniche di congelamento » *Atti X° Ciclo di Conferenze dedicate ai problemi di Meccanica dei Terreni e Ingegneria delle Fondazioni* - Politecnico di Torino - Istituto di Scienza delle Costruzioni, 17/19.

GALLAVRESI F., TORNAGHI R. (1976)
Written contribution - *Session 1 - Proc. 1st International Symposium Tunnelling'76* - Institution of Mining and Metallurgy, London.

HAFFEN M. (1981)
« Tunnels dans les sols instables : État actuel des techniques de consolidation par injection et par congélation » *Comptes rendus Journées d'Études Internationales A. F. T. E. S. sur la recherche d'économie dans les travaux souterrains*, Nice 10, 4 mai.

KHAKIMOV Kh. R. (1966)
« *Artificial Freezing of Soils - Theory and Practice* » Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.

NASONOV I. D. (1969)
« *Còngelamento delle rocce filtranti* » (en russe).

TORNAGHI R., GINETTI L. (1972)
« Soil impermeabilization by grouting and freezing » *Proc. Conference on Protection of Underground Construction against Water*, Bratislava.

TSYTOVICH N. A. (1975)
« *The Mechanics of Frozen Ground* » McGraw Hill Book Co., New York.

VYALOV S. S. (1965)
« *The Strength and Creep of Frozen Soils and Calculations for Ice-Soil Retaining Structures* » Translation No 76, U. S. Army Cold Regions research and Engineering Laboratory, Hanover N. H.