



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

LA CONGÉLATION

ARTIFICIAL FRÉEZING OF SOILS, *IN CIVIL ENGINEERING*

**QUELQUES CONSIDÉRATIONS PRATIQUES AU SUJET
DES MATÉRIELS ET MÉTHODES DANS LA CONGÉLATION
ARTIFICIELLE DES SOLS**

Vittorio Manassero



**UNDERGROUND
CONSULTING**

www.undergroundconsulting.it

CFMS SCIENTIFIC AND TECHNICAL DAY _ NOVEMBER 17TH 2023

SOMMAIRE

1. Introduction.
2. Tubes congélateurs et circuit de distribution.
 - Conception des tubes congélateurs.
 - Installation des tubes congélateurs.
 - Transformation des tubes congélateurs quand la méthode mixte est utilisée.
 - Conception du circuit de distribution.
3. Intégrité et continuité du massif congelé.
 - Contrôle de la trajectoire de tous les forages de congélation (tubes congélateurs et thermométriques).
 - Scellement entre massif congelé et structures existantes.
4. Conclusions.



INTRODUCTION

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Recommandations pratiques au sujet de la congélation artificielle des sols appliquée au génie civil.

Ne pas suivre ces recommandations n'implique pas nécessairement un insuccès dans les travaux de congélation des sols.

Le scope est seulement de **donner des instruments qui puissent améliorer la probabilité de succès technique** et dans le même temps **réduire les coûts et la durée de construction.**



CONCEPTION DES TUBES CONGÉLATEURS

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

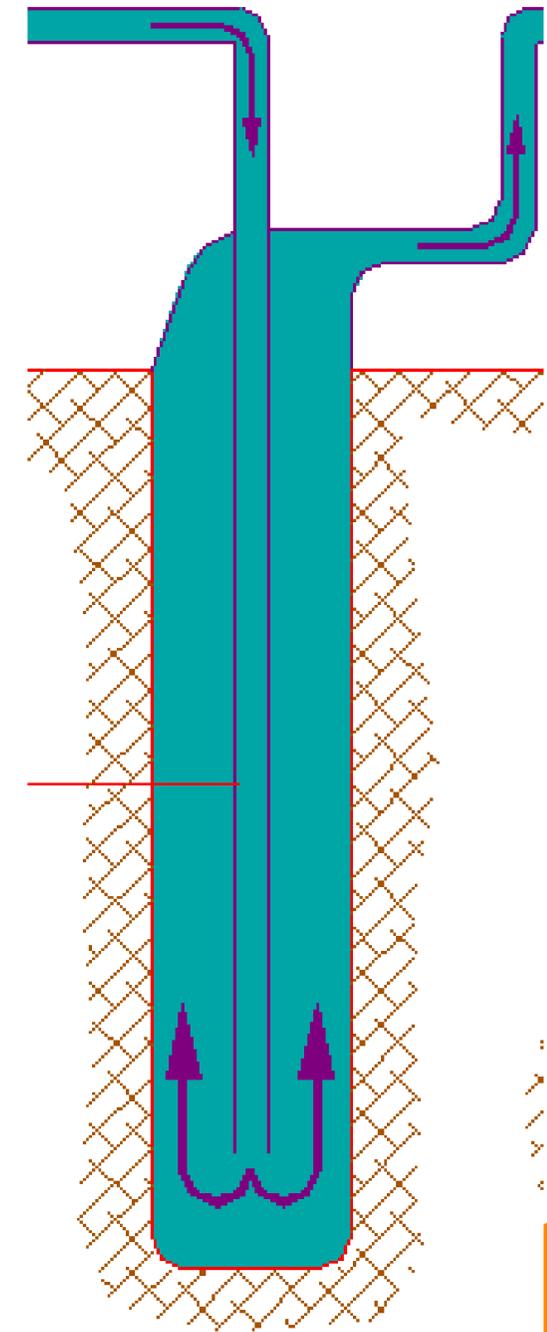
4. CONCLUSIONS

Caractéristiques de tubes congélateurs choisies en fonction :

- ✓ des conditions requises par le projet
- ✓ et du type de fluide refroidissant :
 - Azote Liquide ;
 - Saumure (une solution de CaCl_2 dans l'eau).

Dimension des tubes congélateurs:

- ✓ en principe plus grand est le tube et plus grand est le rendement thermique du système ;
- ✓ Il est recommandé de ne pas utiliser tubes congélateurs avec diamètre extérieur plus petit que 76 mm.



CONCEPTION DES TUBES CONGÉLATEURS



SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

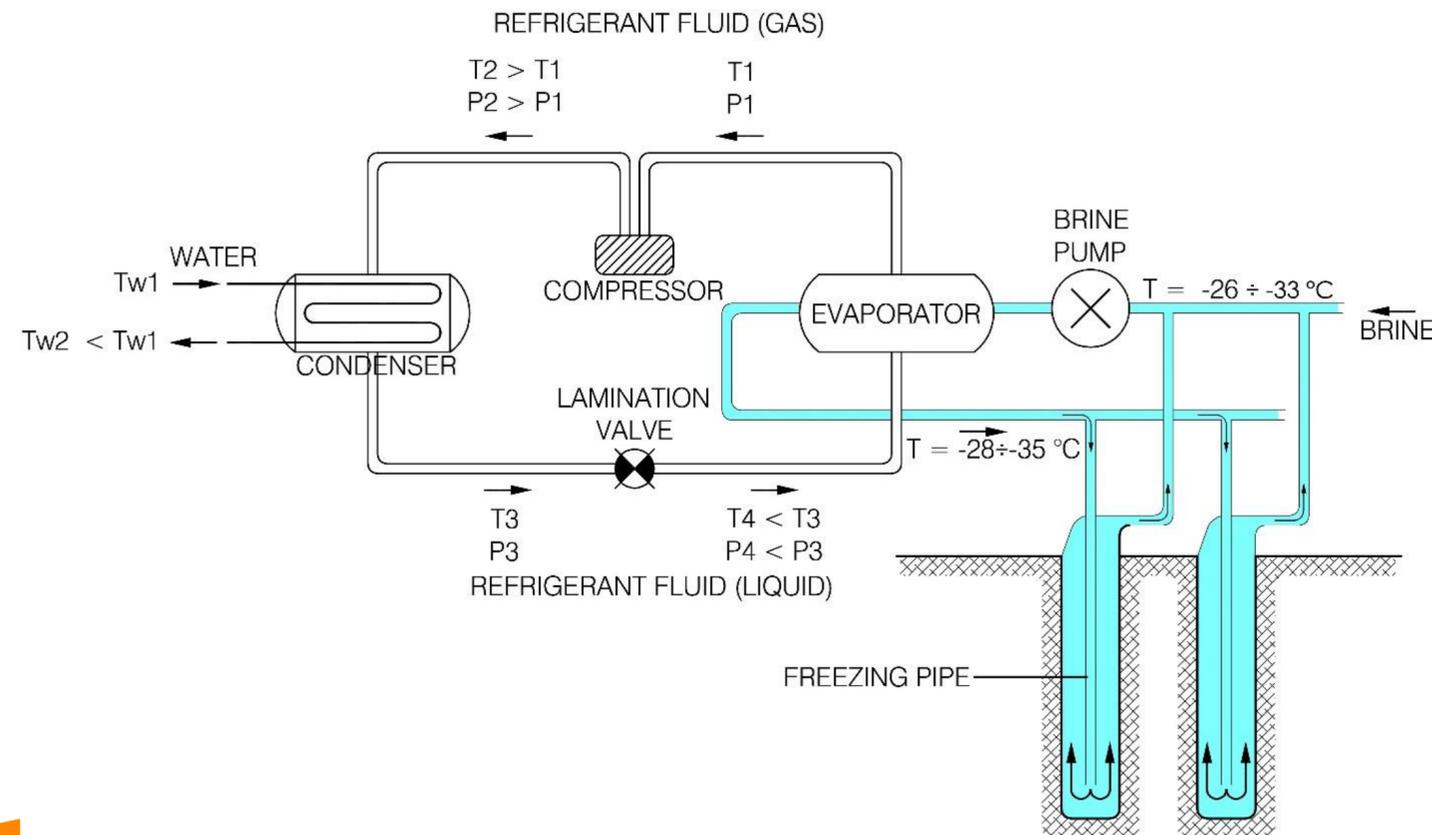
- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massifs congelés et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Saumure

Tube extérieur: **acier** qui satisfait le « **grade 6** » de la norme ASTM 333 (un acier à bas teneur en carbone et haute résilience à basse température, qui minimise le risque de rupture des tubes.

Tube intérieur: **même matériau** que celui extérieur **ou PEHD**.



CONCEPTION DES TUBES CONGÉLATEURS

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

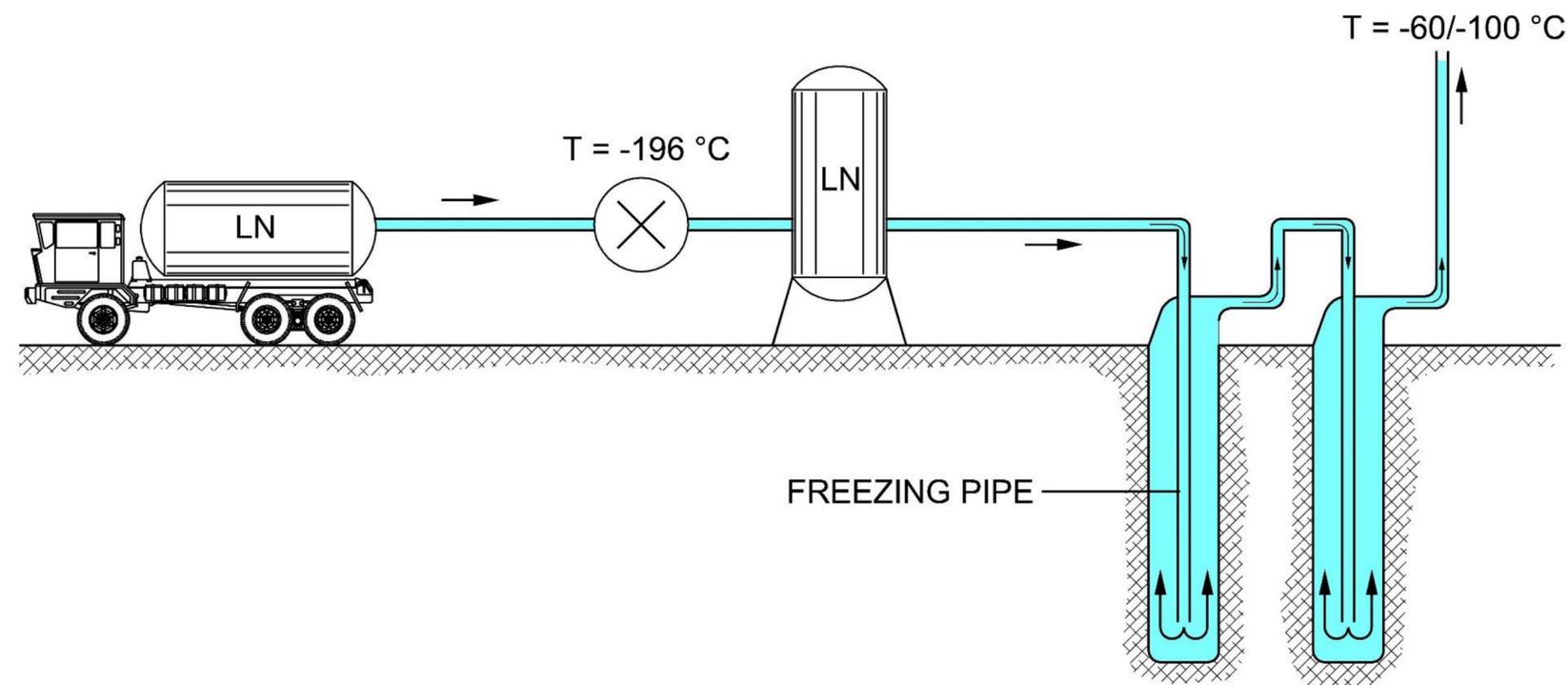
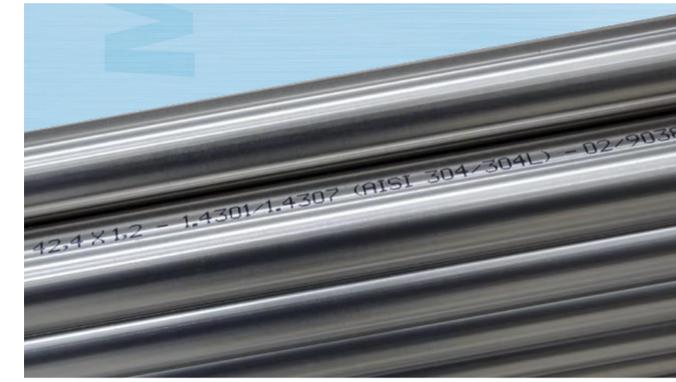
- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massifs congelés et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Azote Liquide

Tubes extérieur et intérieur doivent être réalisés avec matériaux cryogéniques :

- **cuivre**
- **ou acier inoxydable.**



UNDERGROUND
CONSULTING

CONCEPTION DES TUBES CONGÉLATEURS

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

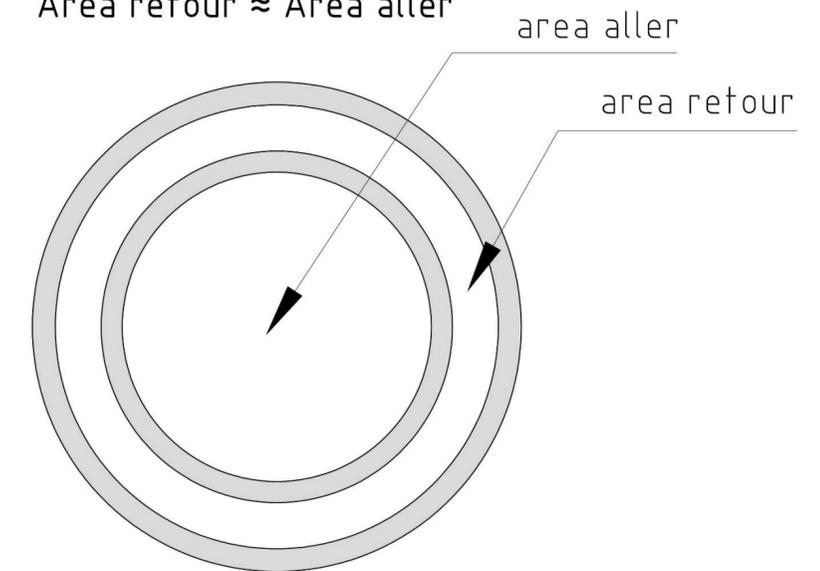
4. CONCLUSIONS

Dimension mutuelle entre diamètre extérieur et intérieur des tubes congélateurs:

- La saumure circule à l'état liquide le long de tout le circuit, tandis que l'azote rentre liquide et il sort gazeux avec une importante augmentation en volume.
- Quand la saumure est utilisée, est **souhaitable** que les **areas de passage** pour l'allée et le retour soient **presque les mêmes**.

Tube congélateur pour saumure

Area retour \approx Area aller



CONCEPTION DES TUBES CONGÉLATEURS

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

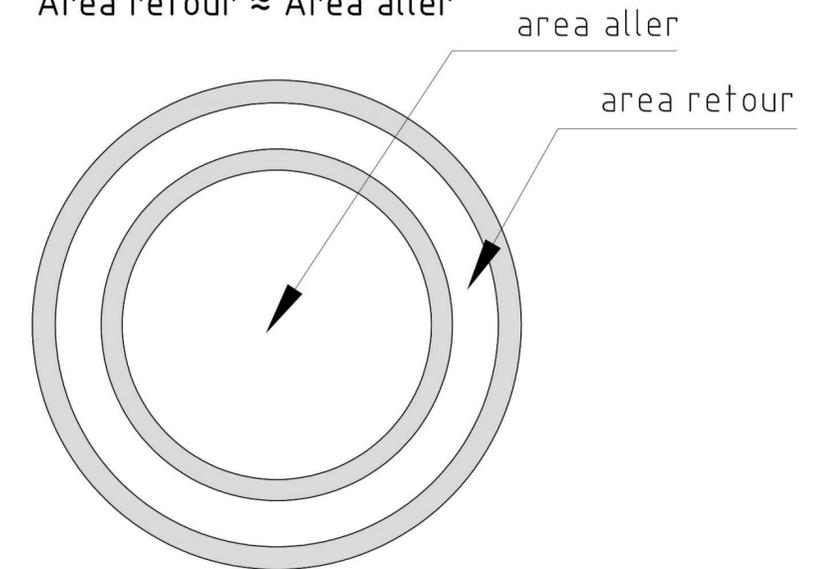
Dimension mutuelle entre diamètre extérieur et intérieur des tubes congélateurs:

- Quand l'azote liquide est utilisé, le tube intérieur devrait avoir un petit diamètre et la **section annulaire** devrait être **considérablement plus grande de celle circulaire**.

Harris (1995): avec azote liquide, tube intérieur pas plus grand de 20 mm.

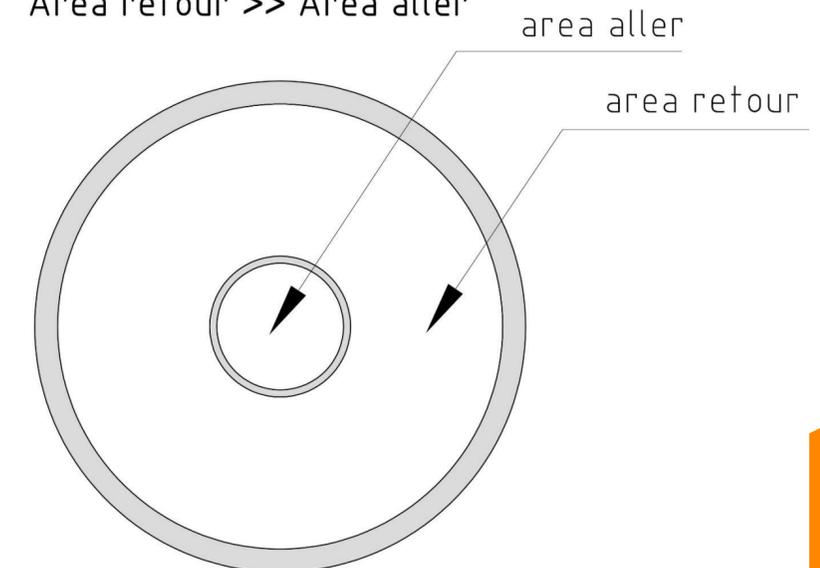
Tube congélateur pour saumure

Area retour \approx Area aller



Tube congélateur pour azote liquide

Area retour \gg Area aller



CONCEPTION DES TUBES CONGÉLATEURS

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Pourquoi il est important que, quand nous utilisons l'azote liquide, le tube intérieur ait un petit diamètre et la section annulaire doit être considérablement plus grande de celle circulaire ?

a) Pour **éviter la prématuré évaporation de l'azote liquide** dans le tube intérieur, ce qui réduit considérablement le rendement thermique du système.

Évaporation \Rightarrow sur la voie de retour, dedans la section annulaire.

Tube intérieur petit \Rightarrow vitesse azote liquide la plus haute possible.

b) Pour éviter une diminution du débit et une augmentation de la pression du fluide, si la section annulaire n'est pas suffisamment grande pour permettre l'évacuation de l'azote gazeux après l'évaporation.



INSTALLATION DES TUBES CONGÉLATEURS

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

- Méthode de forage avec tubage et outils perdus.
Parfois le **tubage perdu** même est utilisé comme **élément extérieur du tube congélateur** :
un spécial bouchon en acier est vissé sur l'outil de forage perdu utilisant un outil spécial et agissant à partir de la bouche du forage en surface.
- Cette pratique **acceptable** seulement **pour forages courts et dans terrains souples et facile à forer**. En effet, avec long forage ou terrains difficiles, bien qu'il y a eu plusieurs cas de succès, il y a aussi eu plusieurs cas de insuccès.
- Insuccès dus principalement aux risques de mauvaise tenue hydraulique au droit du bouchon vissé au fond du tube (possible imprécise installation) et au niveau des joints vissés (conséquence du stress excessif pendant le forage).



INSTALLATION DES TUBES CONGÉLATEURS

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

- Méthode recommandée, quand nous travaillons en dessous de la nappe, est de réaliser les forages avec tubage (et outil) perdu de diamètre suffisant pour pouvoir accueillir, dedans, le tube congélateur à installer ensuite.
- 3 avantages principaux :
 - ✓ Diamètre des tiges plus grand \Rightarrow déviations moins importantes.
 - ✓ Pas des risques d'endommager les tubes congélateurs pendant la réalisation des forages adjacentes, puisque ils ne sont pas encore en place.
 - ✓ Section plus grande, par rapport à celle du tube congélateur : elle permet une plus facile (et jusqu'à une profondeur plus importante) mesure de la trajectoire des forages avec la méthode optique (recommandée pour forages horizontaux ou subhorizontaux).



TRANSFORMATION DES TUBES CONGÉLATEURS AVEC METHODE MIXTE

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

- Dans le cas de la méthode mixte, les tubes congélateurs doivent être adaptés à la circulation de l'azote liquide (pendant la phase de mise en froid), comme de la saumure (pendant la phase de l'entretien).
- Un tube intérieur (d'aller) plus grand du nécessaire pendant la mise en froid
⇓
grave **risque de prématurée évaporation de l'azote liquide**, provoquant, par conséquent, un gaspillage d'énergie thermique.
- Un tube intérieur plus petit du nécessaire pendant l'entretien
⇓
pourrait **réduire excessivement la section de passage** et ne pas permettre la circulation de la saumure avec le débit demandé.



TRANSFORMATION DES TUBES CONGÉLATEURS AVEC METHODE MIXTE

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

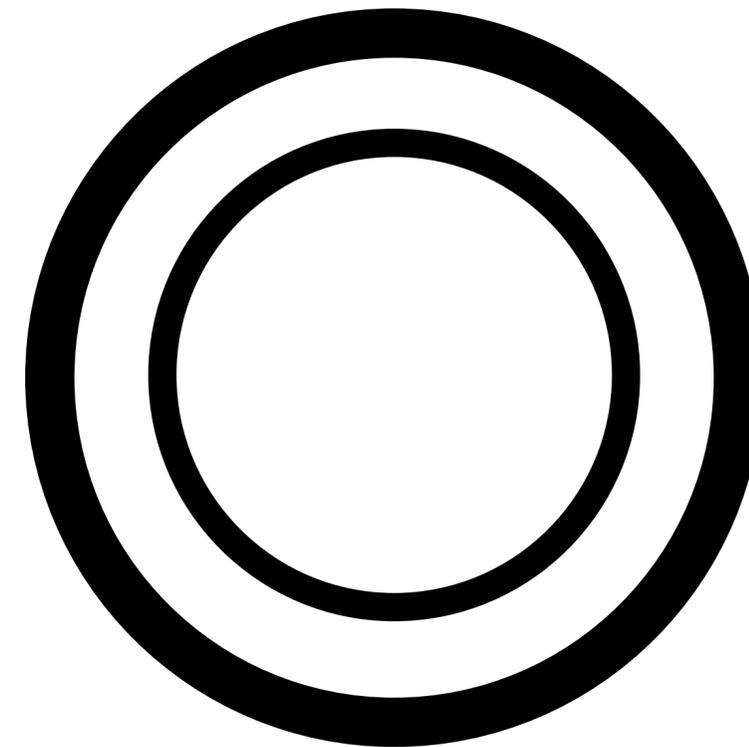
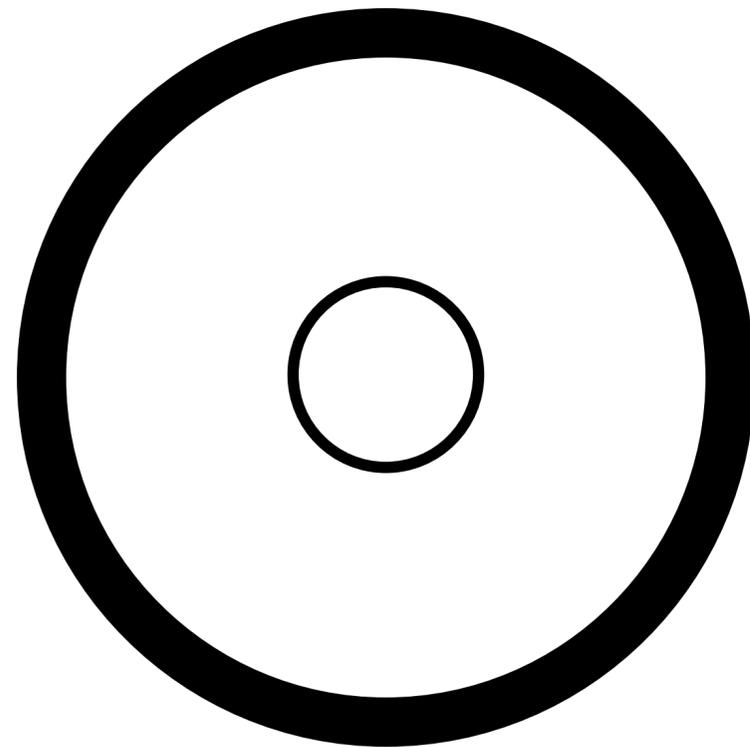
- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

- Le remplacement du tube intérieur quand nous changeons le fluide refroidissant **est en principe nécessaire** : le petit tuyau en cuivre ou acier INOX devrait être enlevé et remplacé par un tuyau plus grand en acier ou PEHD, afin d'égaliser les sections de aller et retour de la saumure pendant l'entretien.



TRANSFORMATION DES TUBES CONGÉLATEURS AVEC METHODE MIXTE

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

- Le remplacement du tube intérieur quand nous changeons le fluide refroidissent **est en principe nécessaire** : le petit tuyau en cuivre ou acier INOX devrait être enlevé et remplacé par un tuyau plus grand en acier ou PEHD, afin d'égaliser les sections de aller et retour de la saumure pendant l'entretien.
- Toutefois, omettre de suivre cette recommandation n'influence pas le résultat technique final de la congélation, mais il **diminue le rendement thermique** du système de refroidissement, impactant par conséquent dans une façon significative sur temps e coûts pendant la phase di mise en froid et sur les coûts pendant la phase d'entretien.



CONCEPTION DU CIRCUIT DE DISTRIBUTION

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGELATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

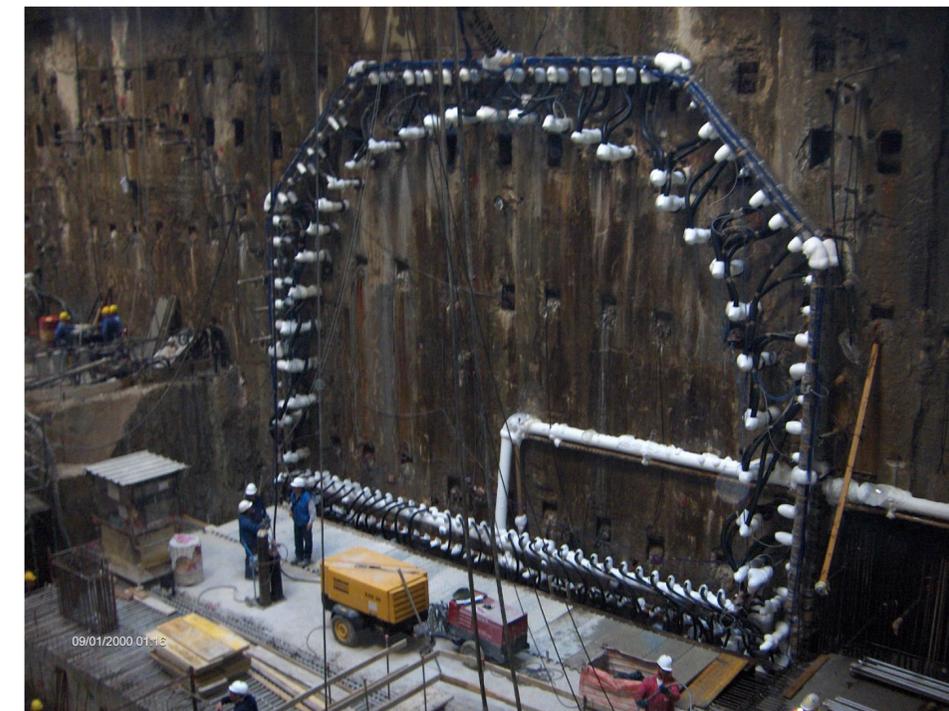
- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Il s'agit d'un système de conduites conçu pour apporter le fluide refroidissant aux tubes congélateurs et pour permettre le retour du fluide moins froid au groupe de réfrigération (dans le cas de la méthode circuit fermé) ou permettre l'évacuation de l'azote gazeux à l'atmosphère (dans le cas de la méthode circuit ouvert).



CONCEPTION DU CIRCUIT DE DISTRIBUTION

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

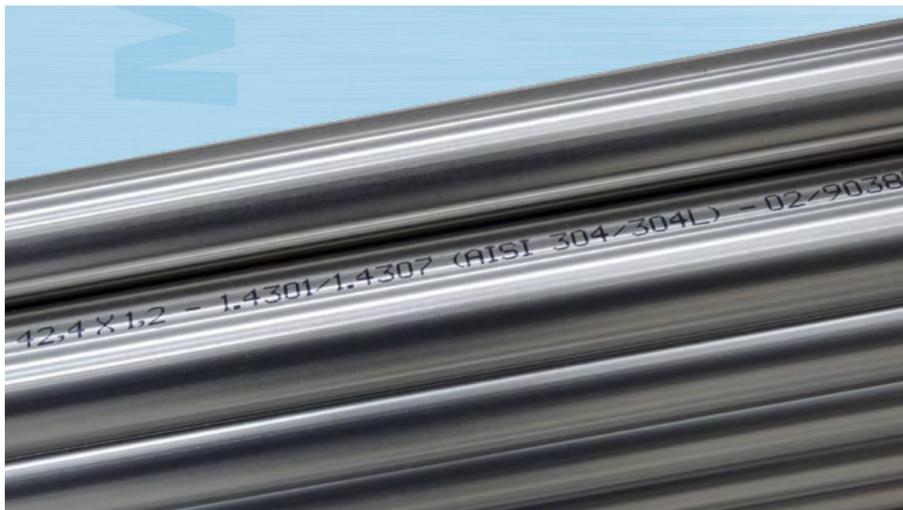
- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Matériaux

Les mêmes règles applicables aux tubes congélateurs sont aussi applicable au circuit de distribution :

- **acier** qui satisfait le « **grade 6** » de la norme ASTM 333 ou **PEHD** pour la saumure ;
- **cuivre** ou **acier inoxydable** pour l'azote liquide.



CONCEPTION DU CIRCUIT DE DISTRIBUTION

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGELATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Ulérieures recommandations sur le circuit de distribution :

- ✓ Méthode à circuit fermé : conduites avec diamètre suffisant pour permettre le passage du fluide, à son maximum débit prévu, avec un **flux laminaire**.
- ✓ Méthode à circuit ouvert : conduites avec diamètre minimum nécessaire pour permettre le passage du fluide à son maximum débit prévu, de manière que la vitesse du fluide soit suffisamment élevée afin d'**éviter la prématuré évaporation** de l'azote liquide.



CONCEPTION DU CIRCUIT DE DISTRIBUTION

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Ulérieures recommandations sur le circuit de distribution:

- ✓ En tous cas, les conduites du circuit de distribution doivent être **isolées thermiquement** dans une façon opportune, afin de minimiser les pertes thermiques le long du circuit.



CONCEPTION DU CIRCUIT DE DISTRIBUTION

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGELATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Méthode mixte:

deux différents et distincts circuits de distribution doivent être installés :

- ✓ un pour l'azote liquide à utiliser pendant la phase de mis en froid
- ✓ et un pour la saumure à utiliser pendant la phase d'entretien.



CONCEPTION DU CIRCUIT DE DISTRIBUTION

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGELATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Le circuit de distribution est inclus entre les matériels réglés par le document “**Pressure Equipment Directive 2014/68/EU**” (aussi connu comme **PED**). Cette directive s’applique à la conception, construction et contrôle des équipements et des ensembles qui sont prévus pour pression d’exercice de plus que 0.5 bar.

Par conséquent, il est recommandable de respecter la PED pour la conception, construction et contrôle des circuits de distribution dans les projets de congélation, en particulier pour l’azote liquide comme fluide refroidissant.

DIRECTIVE 2014/68/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL
of 15 May 2014
on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of pressure equipment
(recast)
(Text with EEA relevance)

THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION,

Having regard to the Treaty on the Functioning of the European Union, and in particular Article 114 thereof,

Having regard to the proposal from the European Commission,

After transmission of the draft legislative act to the national parliaments,

Having regard to the opinion of the European Economic and Social Committee ⁽¹⁾,

Acting in accordance with the ordinary legislative procedure ⁽²⁾,

Whereas:

- ⁽¹⁾ Directive 97/23/EC of the European Parliament and of the Council ⁽³⁾ has been substantially amended ⁽⁴⁾. Since further amendments are to be made, that Directive should be recast in the interests of clarity.
- ⁽²⁾ Regulation (EC) No 765/2008 of the European Parliament and of the Council ⁽⁵⁾ lays down rules on the accreditation of conformity assessment bodies, provides a framework for the market surveillance of products and for controls on products from third countries, and lays down the general principles of the CE marking.
- ⁽³⁾ Decision No 768/2008/EC of the European Parliament and of the Council ⁽⁶⁾ lays down common principles and reference provisions intended to apply across sectoral legislation in order to provide a coherent basis for revision or recasts of that legislation. Directive 97/23/EC should therefore be adapted to that Decision.
- ⁽⁴⁾ This Directive covers pressure equipment and assemblies which are new to the Union market when they are placed on the market; that is to say they are either new pressure equipment or assemblies made by a manufacturer established in the Union or pressure equipment or assemblies, whether new or second-hand, imported from a third country.
- ⁽⁵⁾ This Directive should apply to all forms of supply, including distance selling.

⁽¹⁾ OJ C 67, 6.3.2014, p. 101.

⁽²⁾ Position of the European Parliament of 15 April 2014 (not yet published in the Official Journal) and decision of the Council of 13 May 2014.

⁽³⁾ Directive 97/23/EC of the European Parliament and of the Council of 29 May 1997 on the approximation of the laws of the Member States concerning pressure equipment (OJ L 181, 9.7.1997, p. 1).

⁽⁴⁾ See Annex V, Part A.

⁽⁵⁾ Regulation (EC) No 765/2008 of the European Parliament and of the Council of 9 July 2008 setting out the requirements for accreditation and market surveillance relating to the marketing of products and repealing Regulation (EEC) No 339/93 (OJ L 218, 13.8.2008, p. 30).

⁽⁶⁾ Decision No 768/2008/EC of the European Parliament and of the Council of 9 July 2008 on a common framework for the marketing of products and repealing Council Decision 93/465/EEC (OJ L 218, 13.8.2008, p. 82).



INTÉGRITÉ E CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTÉGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

- Souvent le scope de la congélation est : permettre un terrassement ou un creusement de tunnel en dessous de la nappe en sécurité et presque au sec.
- Nécessaire une chambre fermée et étanche encerclée par le massif congelé et par des autres éventuels éléments (comme structures existantes, bouchon de fond naturels ou artificiels, etc.)
- Il est très important que la continuité du massif congelé soit assurée.
- Pour assurer que la continuité du massif congelé soit atteinte avant de commencer le terrassement ou le creusement, il faut appliquer à l'avance des **mesures de précaution spécifiques**.



CONTRÔLE DE LA TRAJECTOIRE DE TOUS LES FORAGES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

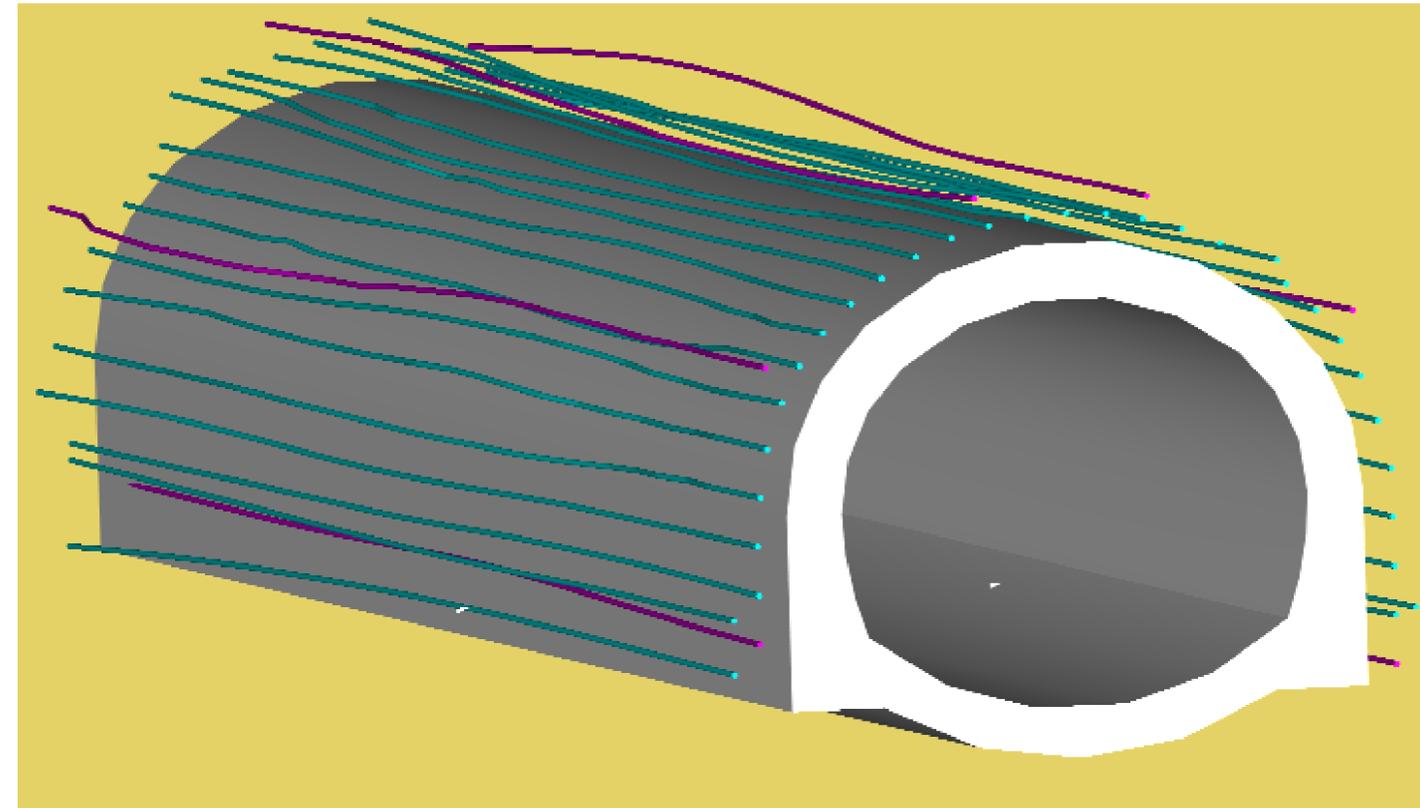
- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Le contrôle de la géométrie réelle du réseau de tubes congélateurs et des chaînes thermométriques est essentiel pour :

- reconnaître à l'avance les potentiels points faibles du futur massif congelé, afin de pouvoir le renforcer grâce à des tubes congélateurs additionnels ;
- et aussi pour mieux comprendre le monitoring des températures pendant la congélation.

Chaque forage de congélation doit être contrôlé et sa trajectoire réelle mesurée par méthodes fiables, afin de tirer la géométrie 3-D réelle des tubes congélateurs comme des chaînes thermométriques.



CONTRÔLE DE LA TRAJECTOIRE DE TOUS LES FORAGES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Quand le contrôle des forages manifeste des distances mutuelles entre tubes congélateurs adjacentes suffisamment grand pour résulter potentiellement dangereux pour l'intégrité et la continuité du massif congelé à construire, il faut réaliser des forages additionnels équipés avec tubes congélateurs, afin de fermer ces ouvertures excessives, pour rentrer dedans la limite de ouverture maximale prescrite par les spécifications techniques.

Ces nouveaux forages : contrôlés à nouveau en termes de trajectoire, afin de vérifier si l'objectif a été atteint. En cas d'insuccès, il faudra réaliser (et contrôler) des autres forages additionnels, jusqu'à quand tout autour la surface du massif congelé à construire il n'y a plus d'ouvertures localisées plus grandes de la limite prescrite par les spécifications techniques.



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

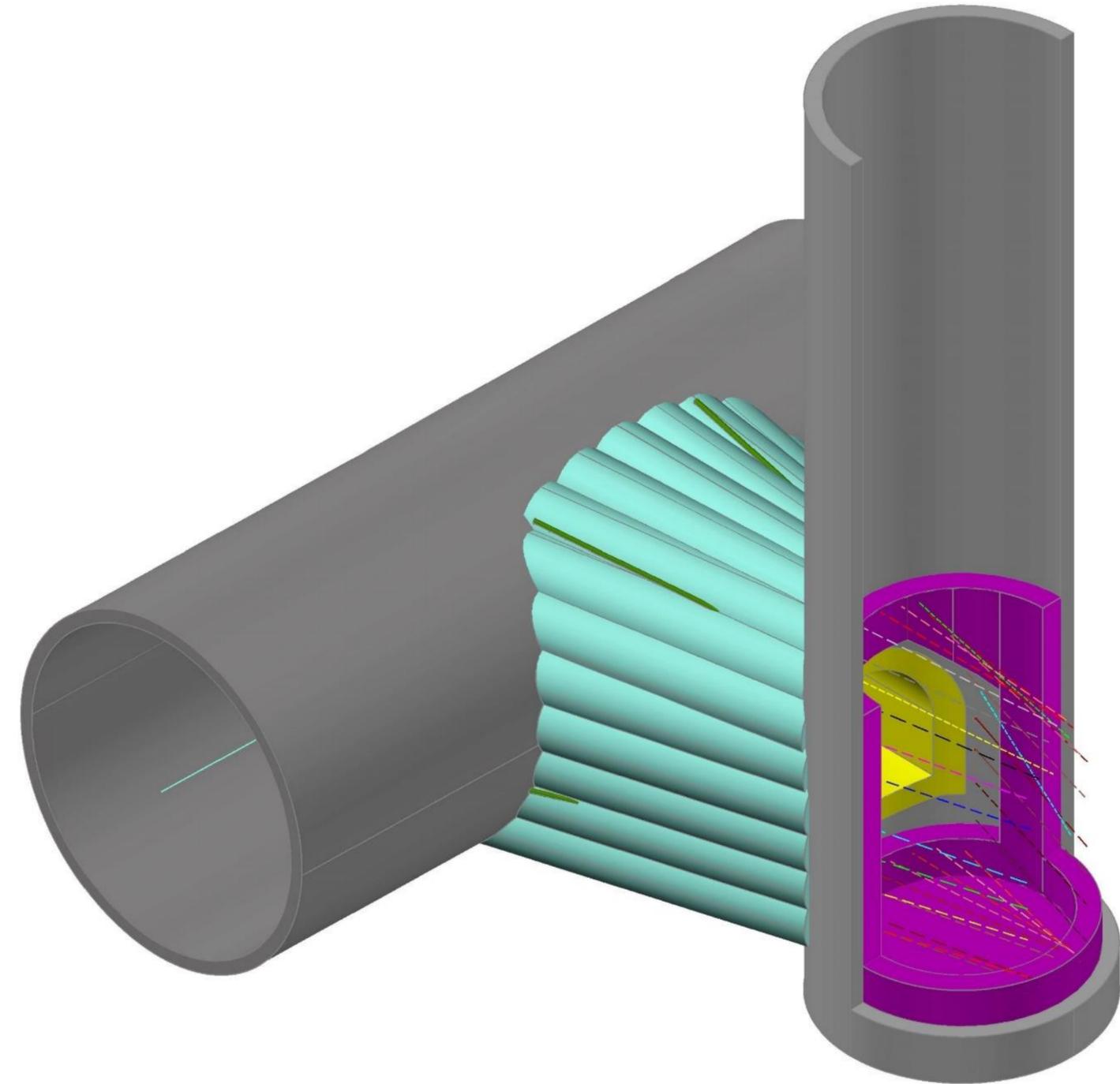
- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massifs congelés et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Autre possible raison de discontinuité : la éventuelle manque de scellement entre massif congelé et éventuelles structures existantes qui font part des limites de la chambre fermée.



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

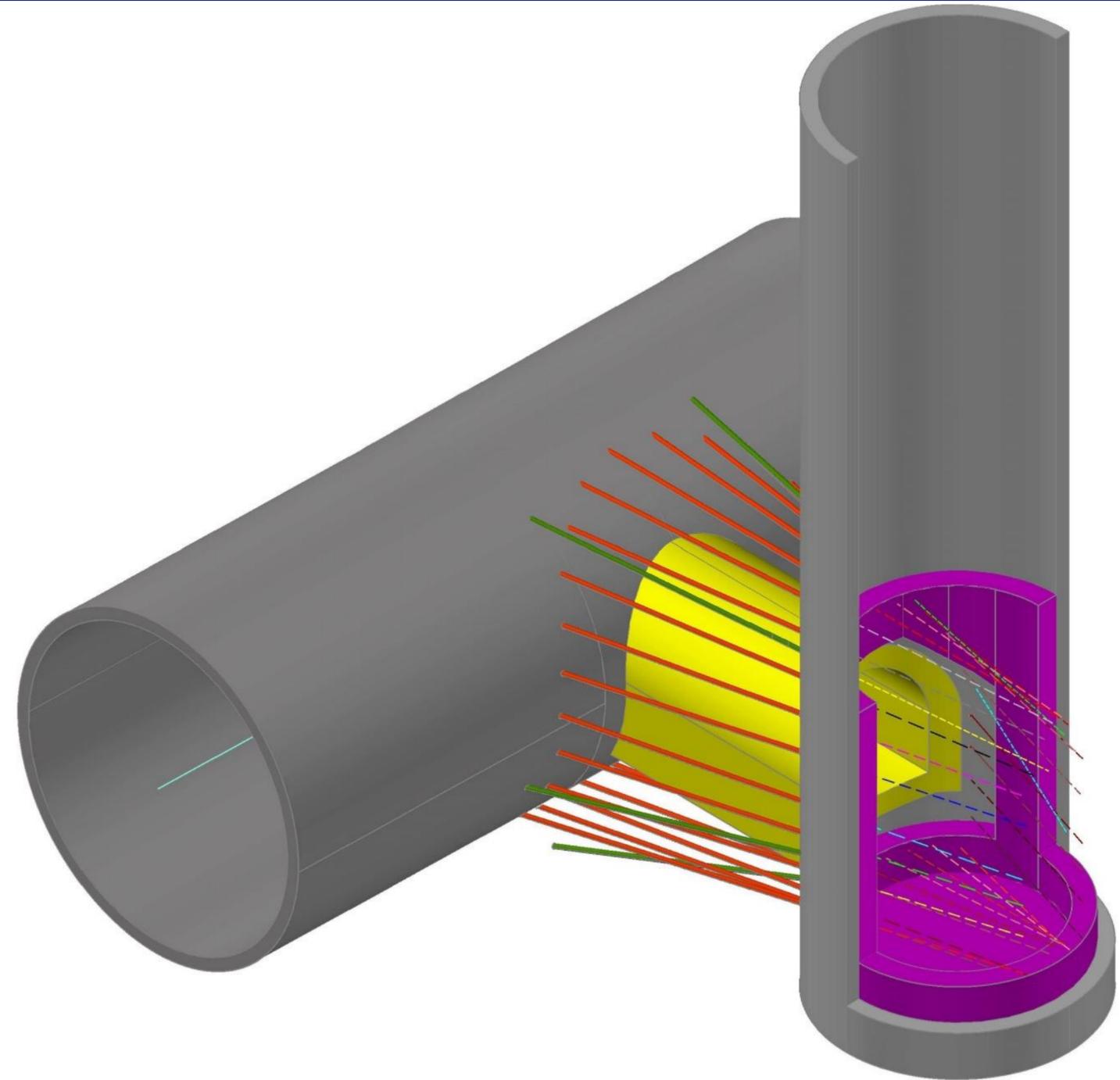
- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Quand :

- deux structures souterraines doivent être reliées
- et les tubes congélateurs installés à partir d'un seul côté,

les forages réalisés horizontalement (ou sub-horizontalement) à partir de la structure de départ s'arrêtent quand ils atteignent et touchent la surface extérieure de la structure d'arrivée.



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

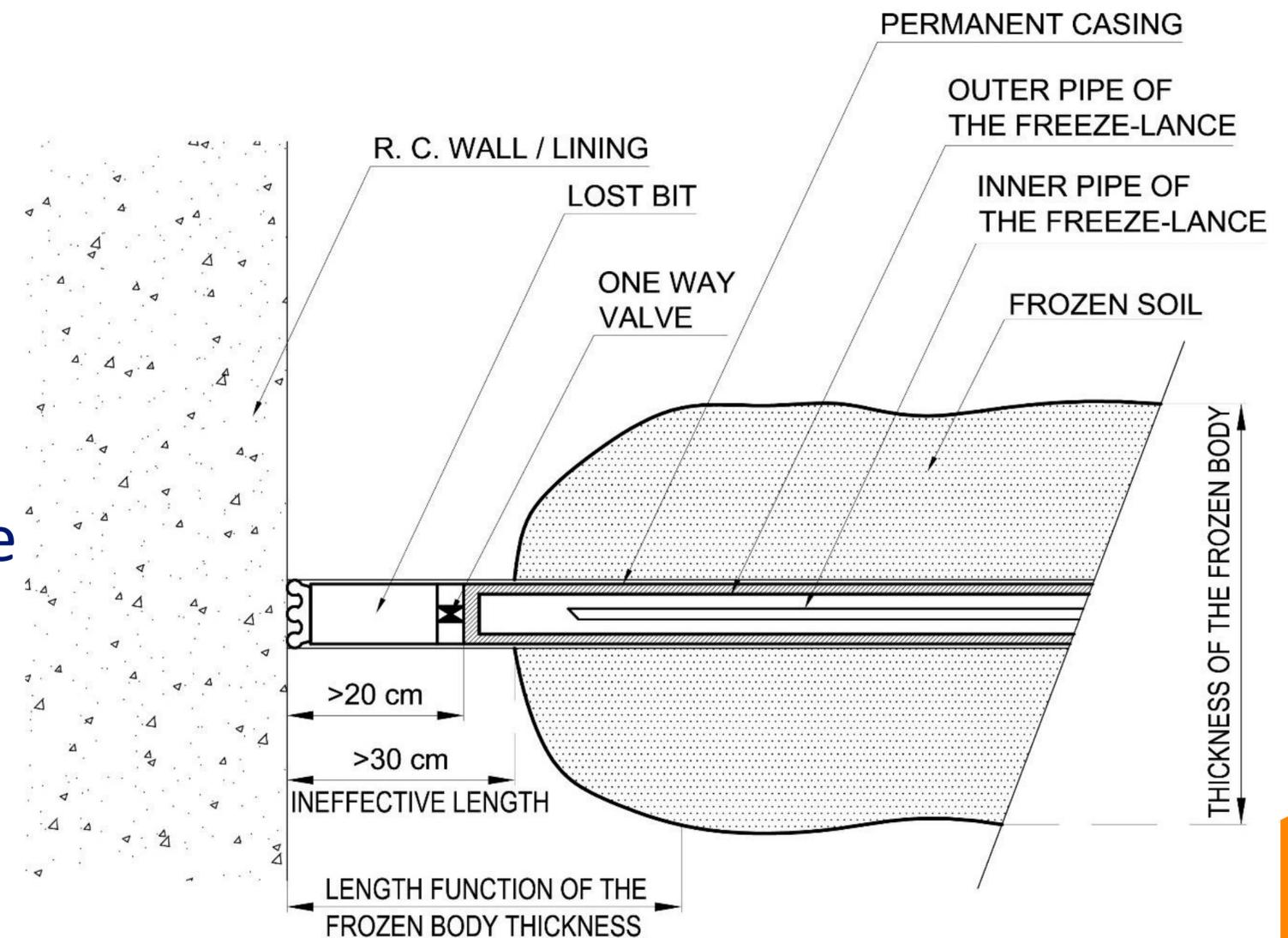
4. CONCLUSIONS

Travailler à un niveau en dessous de la nappe impose le **forage sous S.A.S.**

Souvent la méthode de forage utilisée est celle du **tubage et outil perdu.**

L'extrémité du tuyau extérieur du tube congélateur **ne peut pas atteindre et toucher** la surface extérieure de la structure d'arrivée, parce que il y a l'outil perdu au fond du forage.

En plus, la **longueur efficace** du tube congélateur est celle intéressée par la circulation du fluide refroidissant, c'est-à-dire jusqu'au bout du tube intérieur.



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

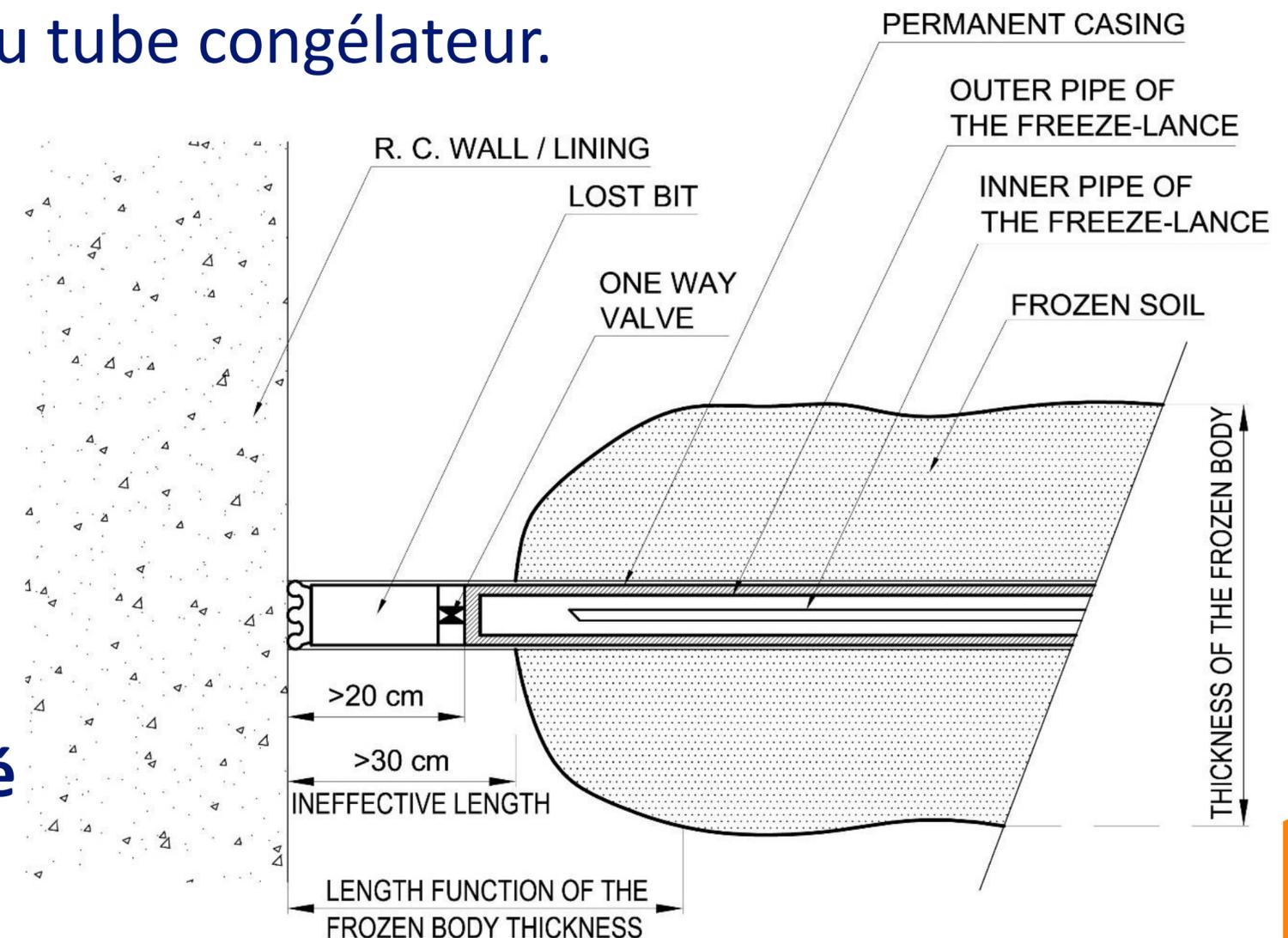
2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

L'extraction de la chaleur du terrain s'avère principalement en **direction radiale** et très peu en direction longitudinale. Il se traduit en laissant, à la fin de la phase de congélation, pratiquement non gelé le terrain au de là de l'extrémité de la longueur efficace du tube congélateur.

Une partie du forage de congélation reste pratiquement inefficace, avec un risque de la présence d'un écart de quelques décimètres de terrain non gelé entre la fin de la longueur efficace du tube congélateur et la surface extérieure de la structure d'arrivée. **Cet écart doit être éliminé en quelque sorte.**



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

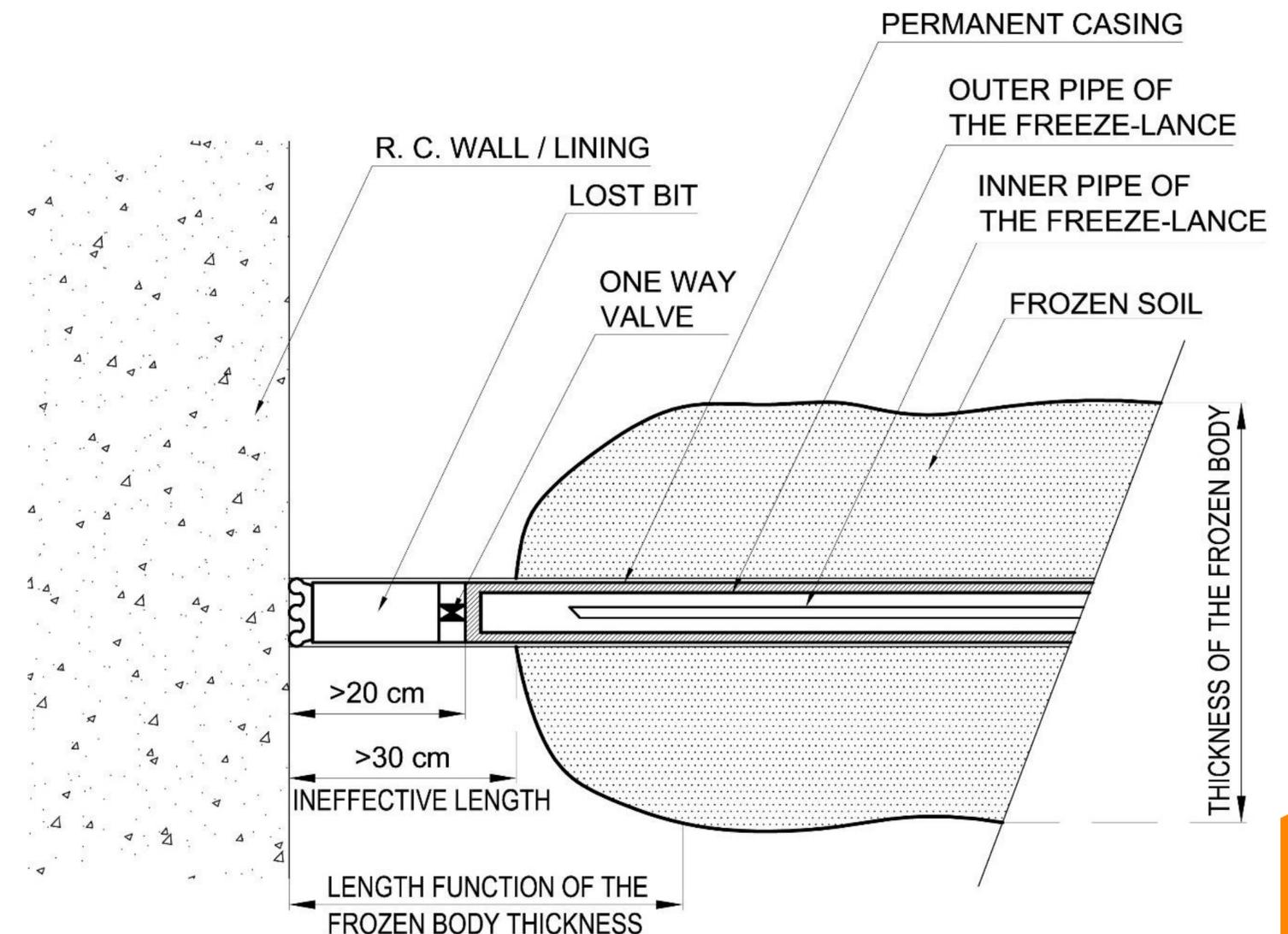
2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Une manière pour éliminer cet écart pourrait être de **prolonger ultérieurement la phase de mise en froid** jusqu'à quand l'écart soit fermé.

Mais cette solution peut comporter une augmentation significative des temps et des coûts de réalisation du projet de congélation, puisque la progression du front gelé en direction longitudinale se manifeste plutôt lentement.



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

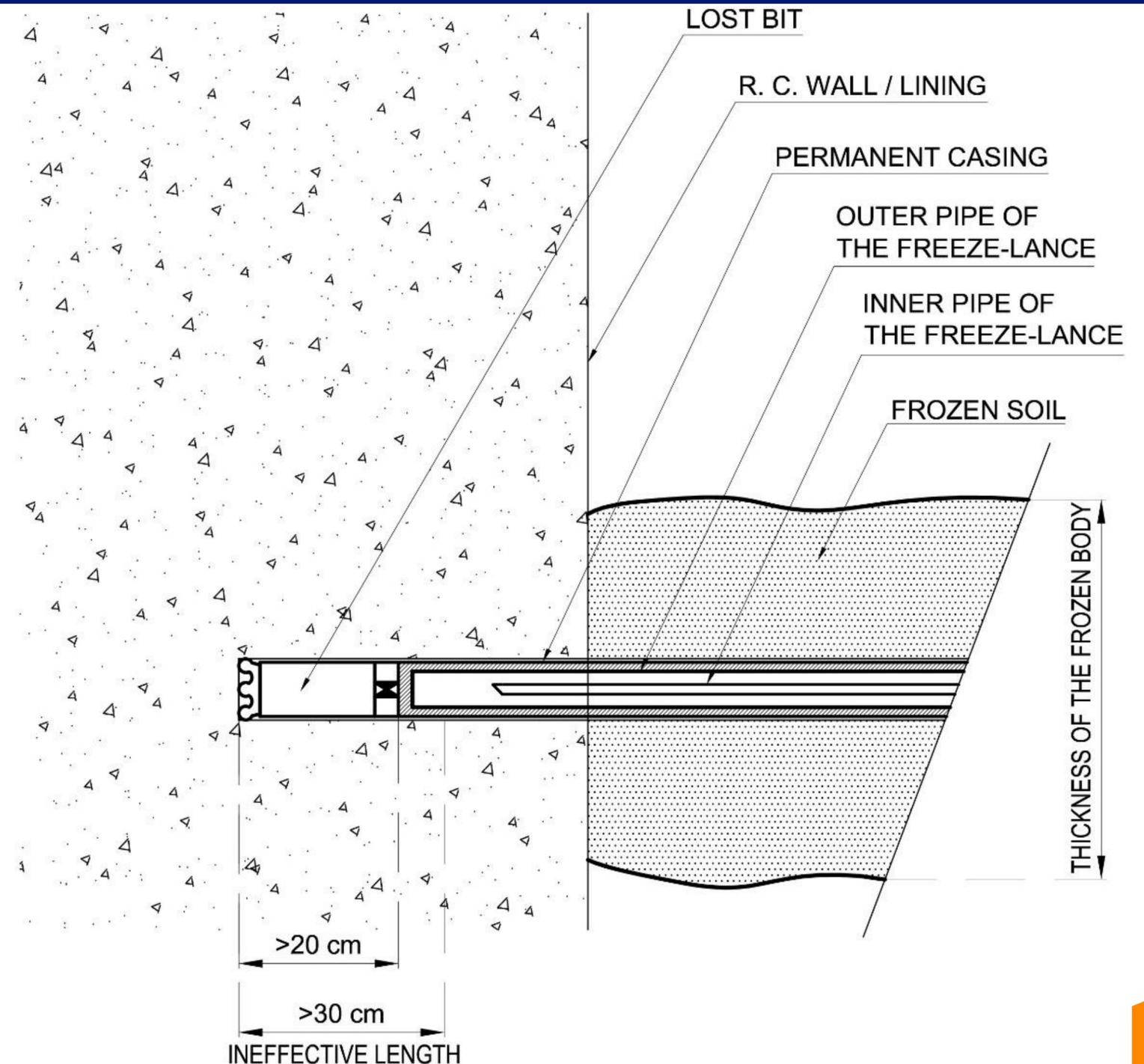
2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Une possible alternative serait de **pénétrer à travers la structure d'arrivée existante avec le forage**, pour assurer un approprié recouvrement entre longueur efficace du tube congélateur et la structure d'arrivée.

Mais normalement cette solution n'est pas facile à appliquer.



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGELATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

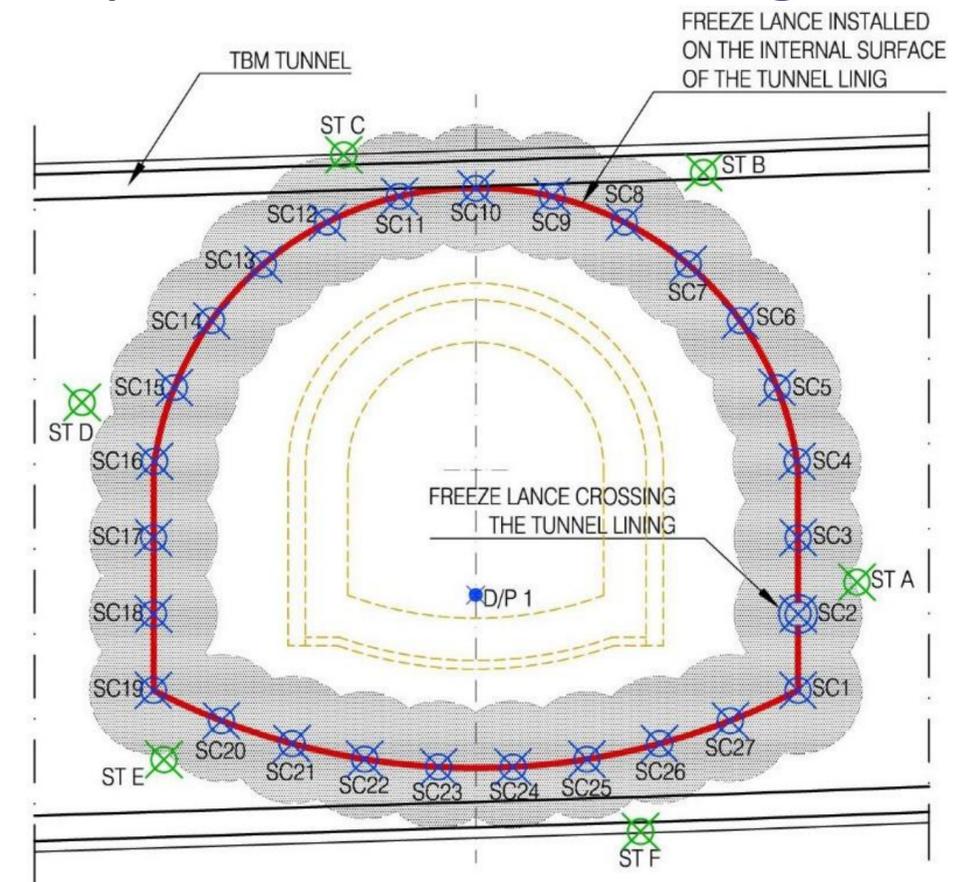
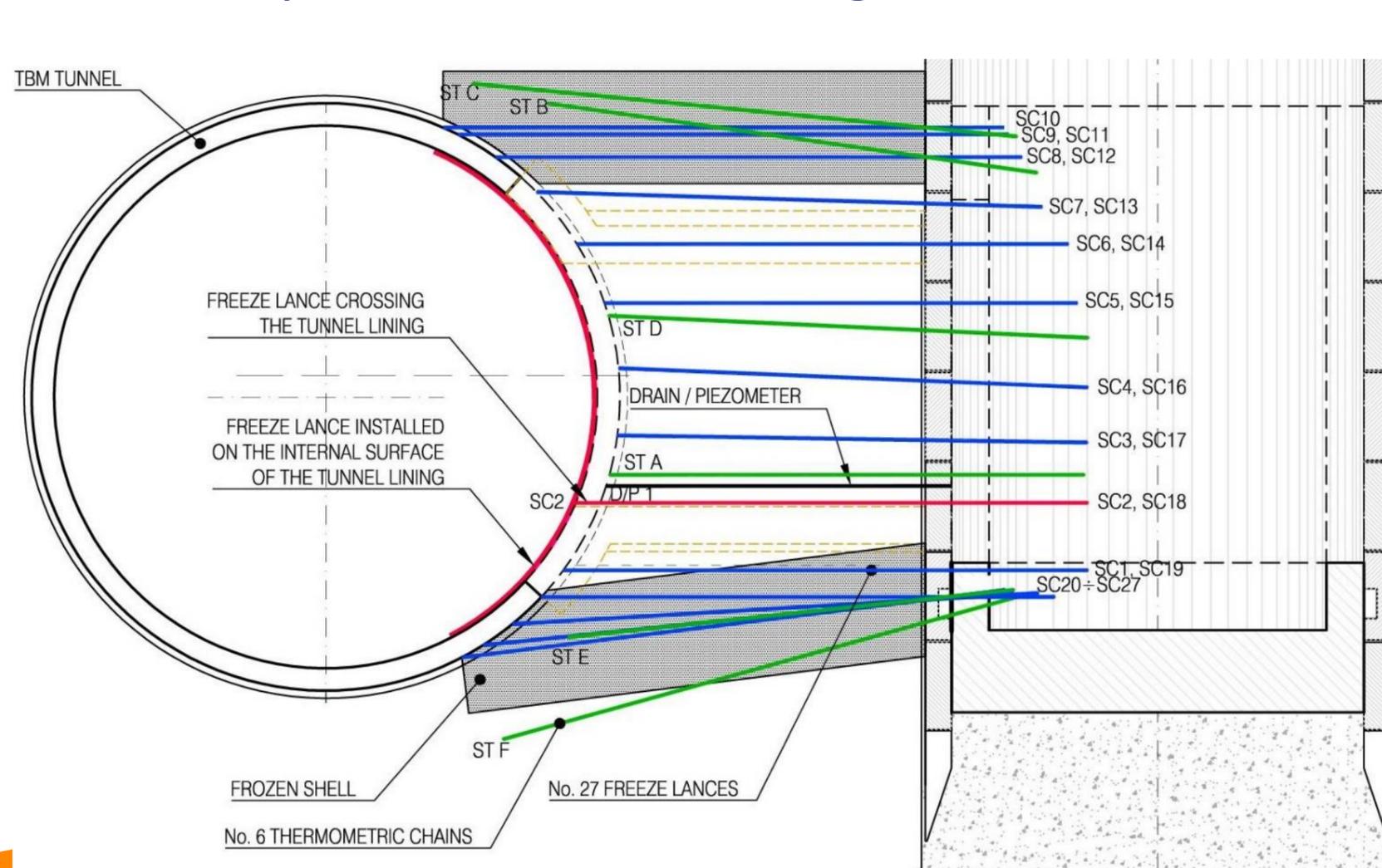
- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Une ultérieure alternative serait de **installer un tube congélateur sur la surface intérieure de la structure d'arrivée**, afin de contribuer à la construction du massif congelé en extrayant chaleur à travers la structure en béton armé existante, pour refroidir et congeler du côté d'arrivée le potentiel écart non gelé.



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGELATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

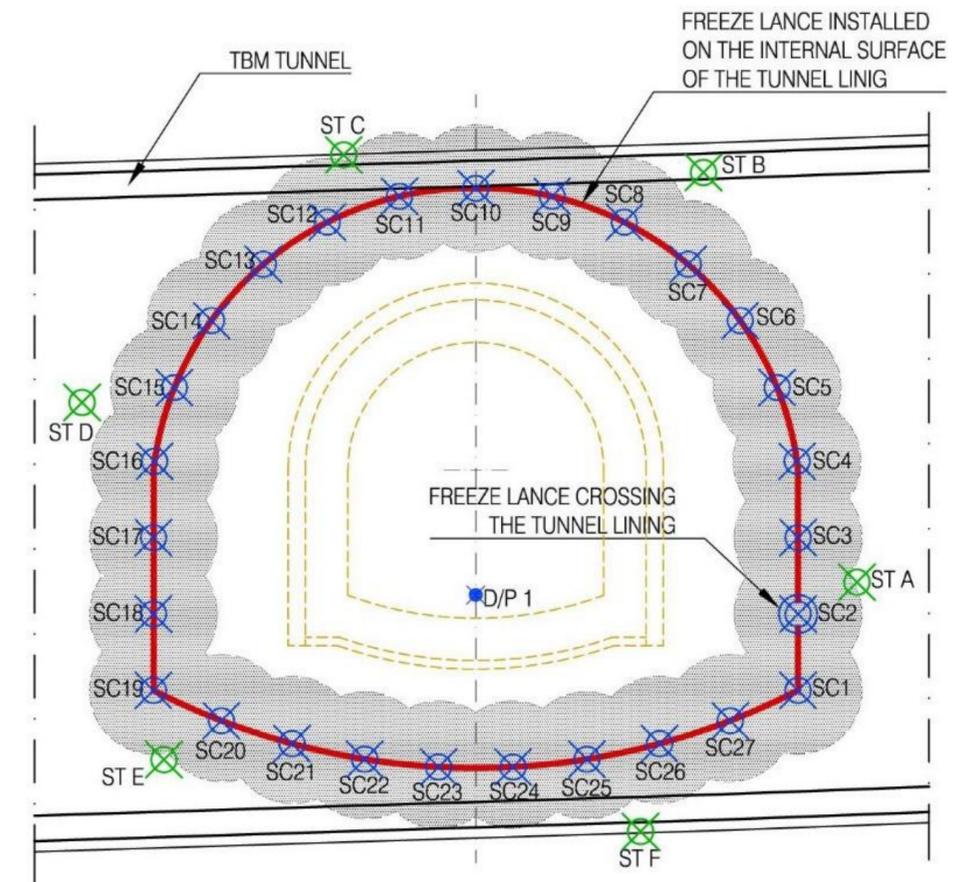
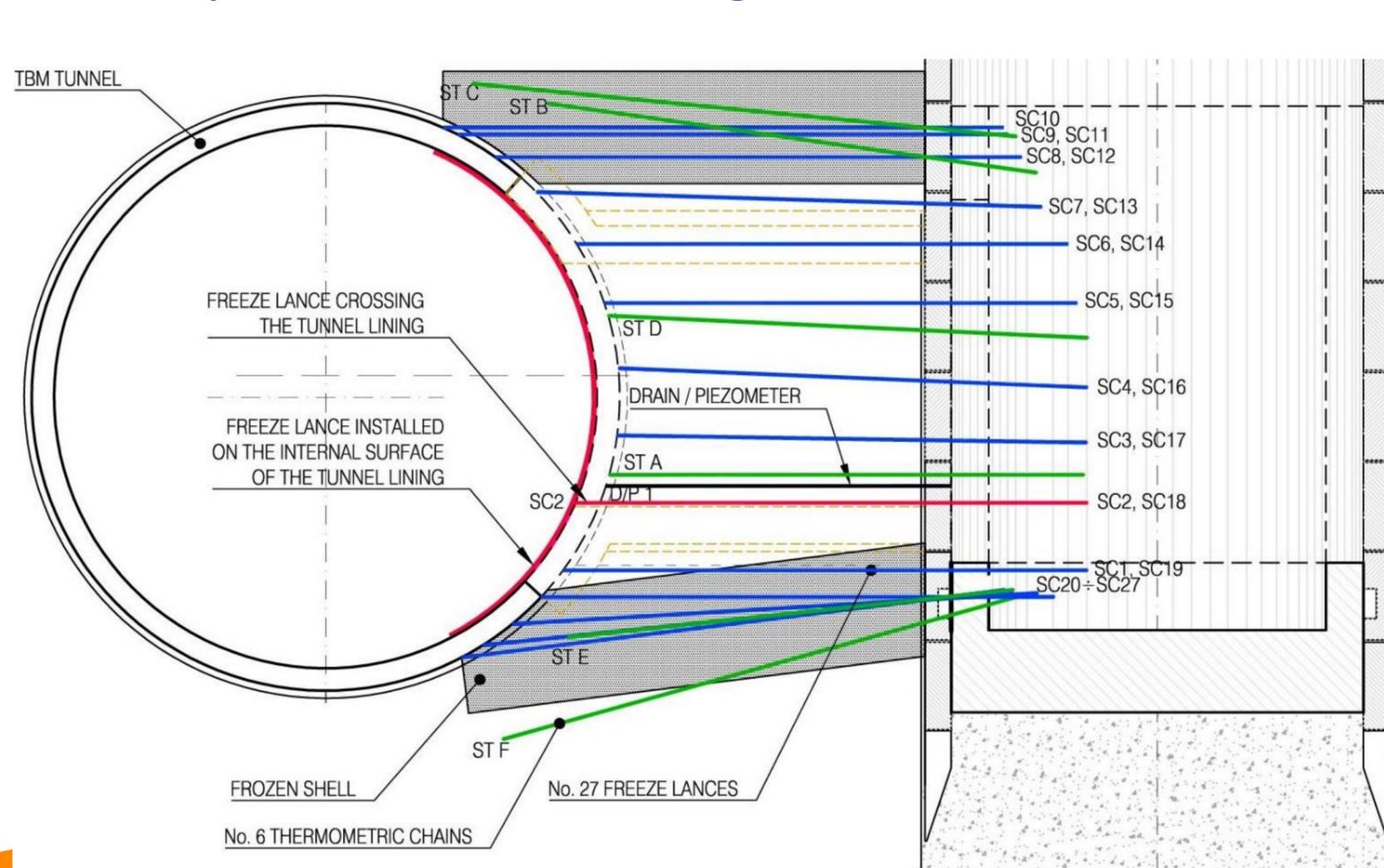
- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Ce tube congélateur additionnel peut simplement être réalisé par un seul tuyau, sans besoin du tuyau intérieur concentrique; l'utilisation d'une section carrée ou rectangulaire, au lieu de circulaire, peut améliorer l'échange thermique entre tube congélateur additionnel et structure en béton armé.



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGELATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

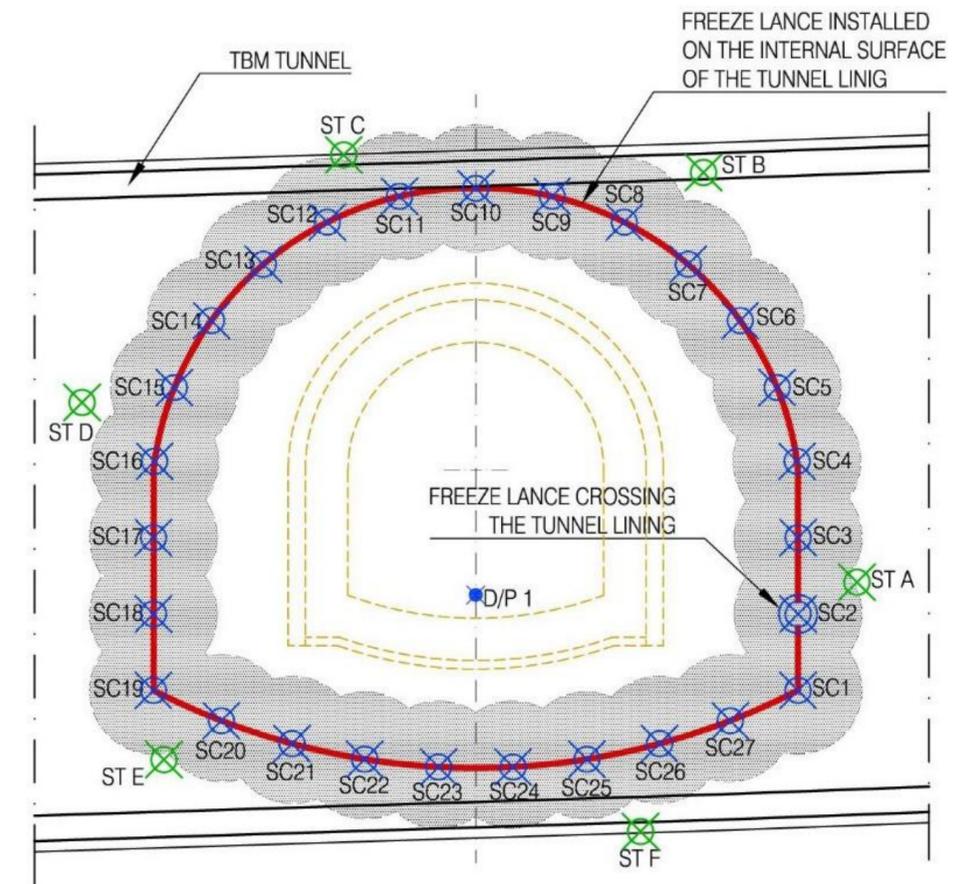
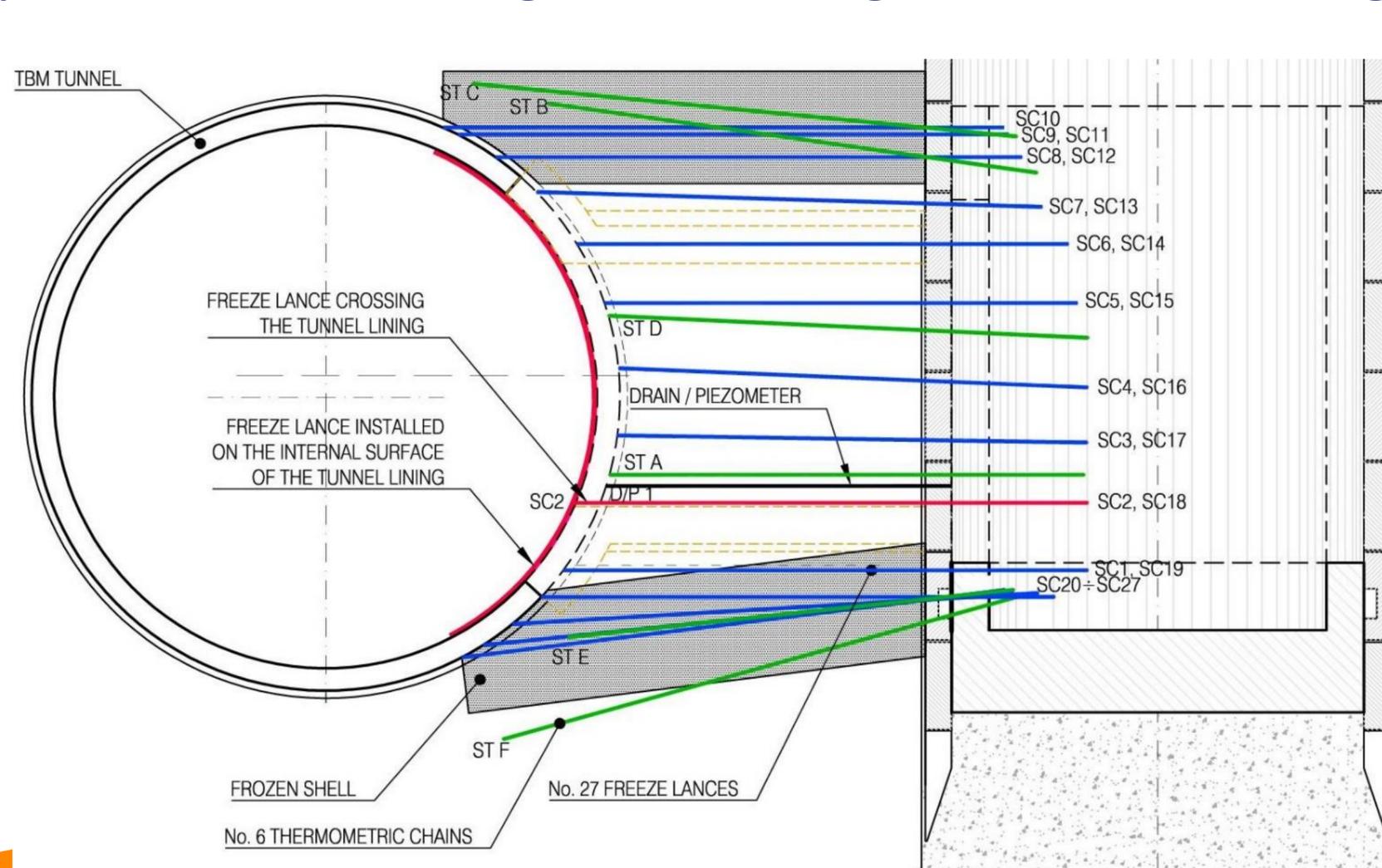
- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Il est possible de relier le tube congélateur additionnel dans la structure d'arrivée avec le circuit principal dans la structure de départ traversant complètement la structure en béton armé d'arrivée avec un des forages prévus pour les tubes congélateurs et grâce au tube congélateur installé dedans.



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

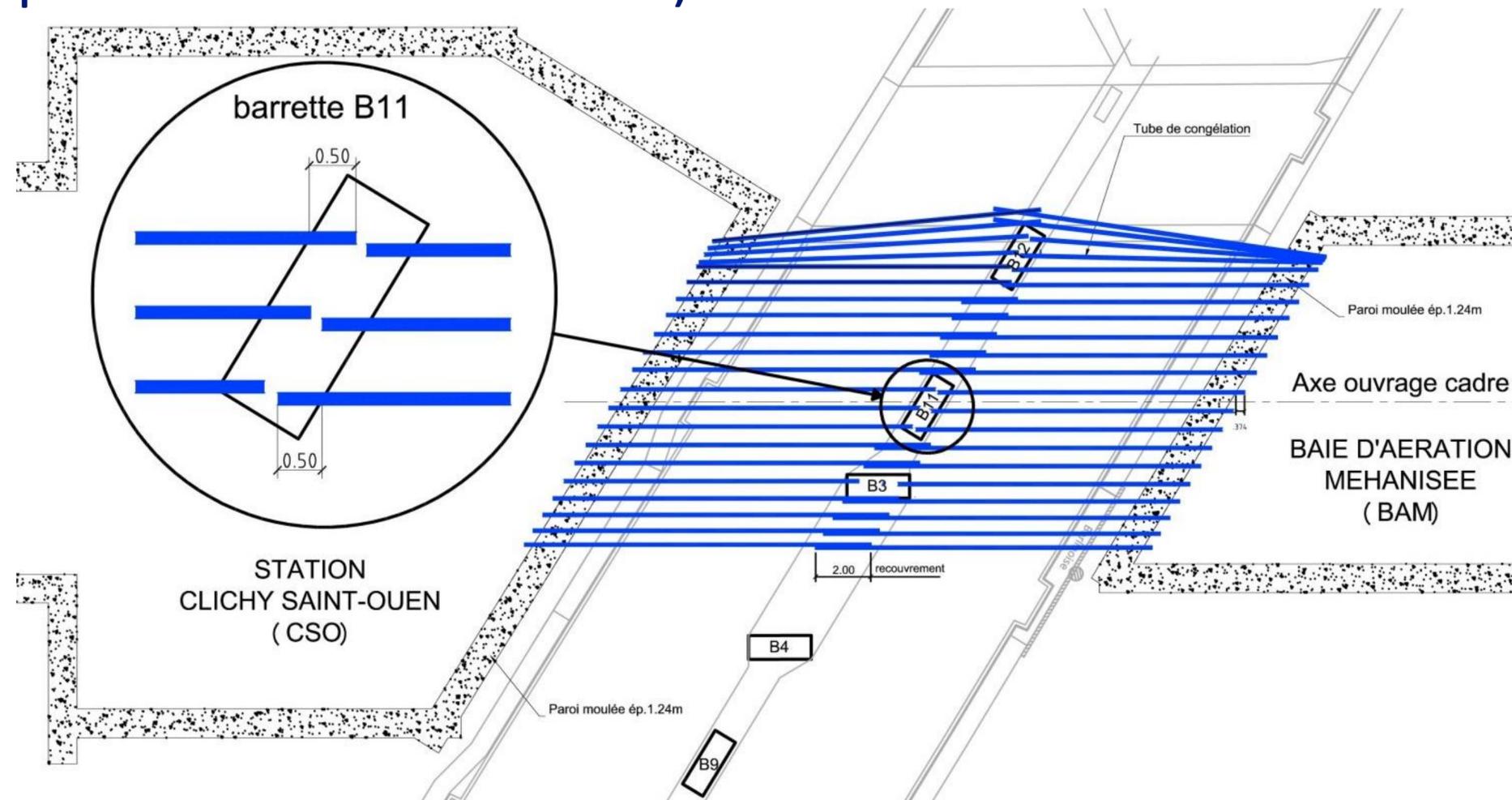
- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

An autre cas où l'intégrité et la continuité du massif congelé peut être à risque c'est quand pour relier deux structures souterraines il faut installer les tubes congélateurs à partir des deux côtés et les forages doivent s'arrêter quand ils touchent des autres structures existantes (comme, par exemple, pieux forés ou barrettes) au milieu.



SCELLEMENT ENTRE MASSIF CONGELÉ ET STRUCTURES EXISTANTES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGELATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

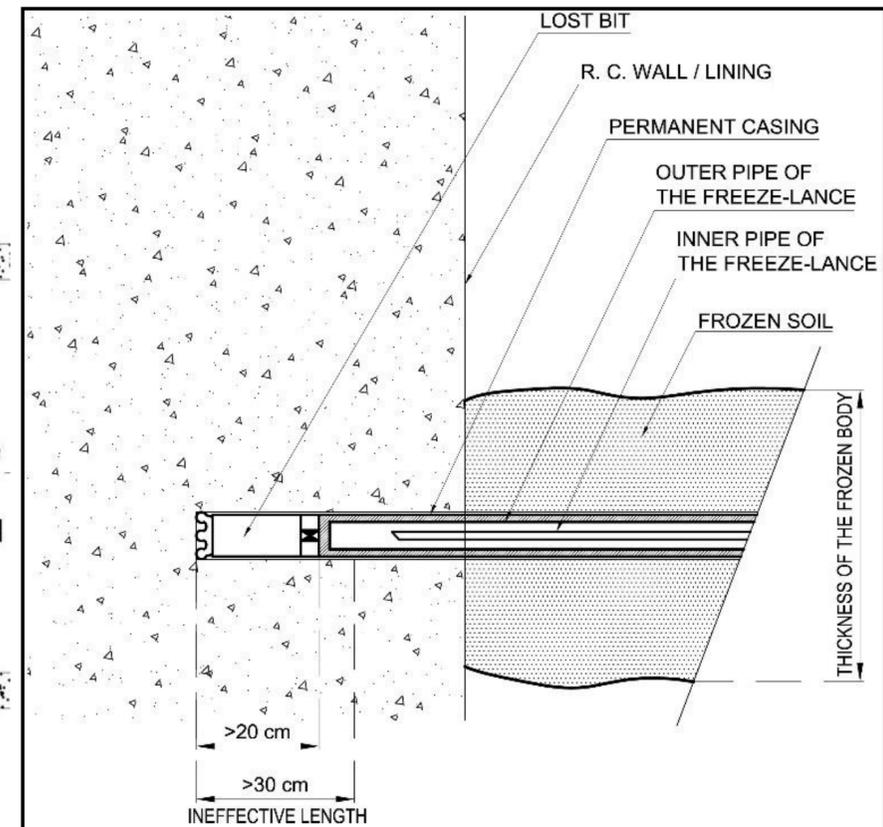
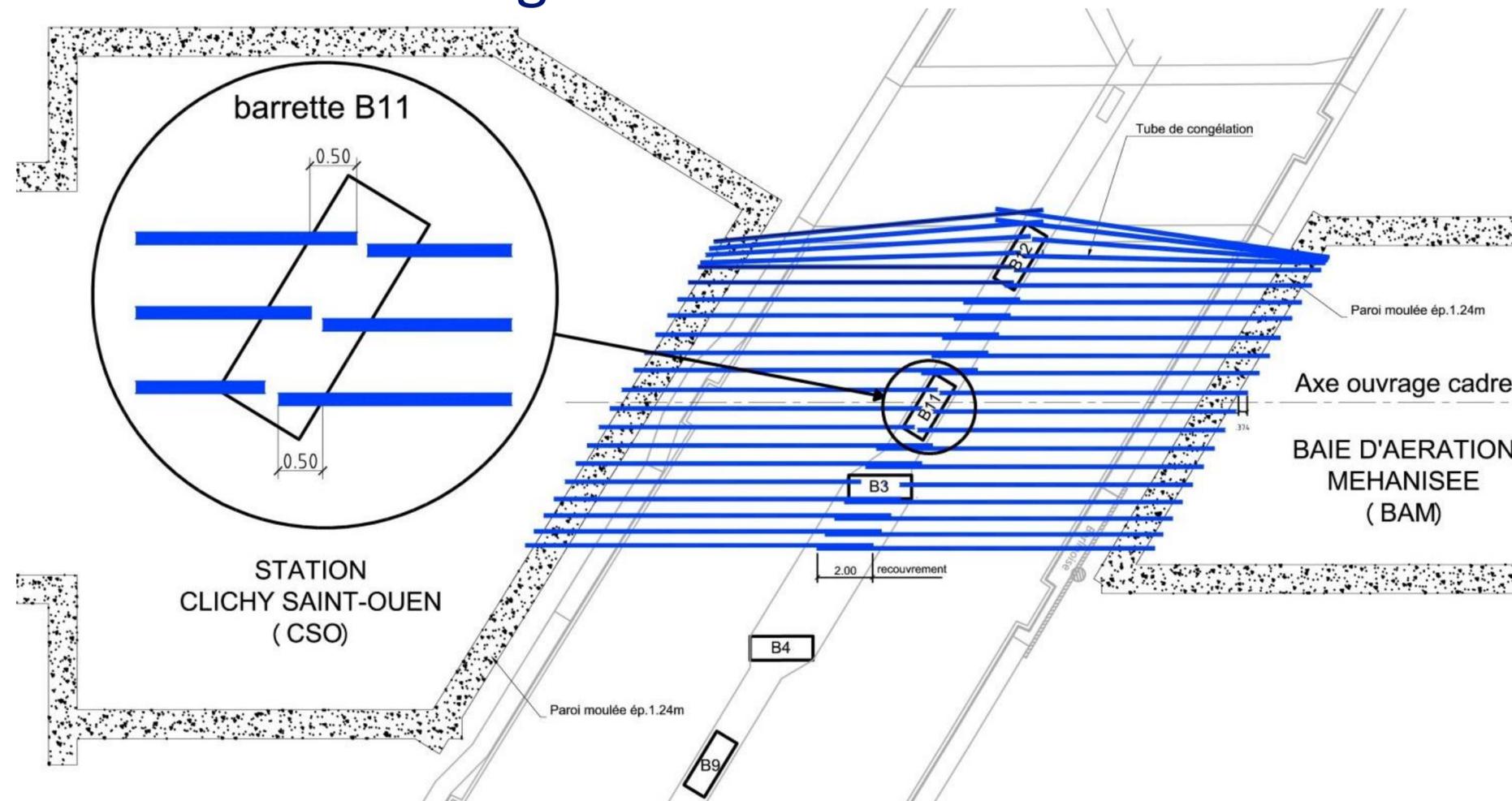
- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGELÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

Pour éviter qu'il y a des écarts de terrain non gelé au points de contact avec les structures existantes au milieu, le conseil est de pénétrer avec les forages dans les structures an béton armé, des deux côtés, pour au moins la longueur inefficace du tube congélateur, afin d'avoir un recouvrement suffisant entre longueur efficace et structure existante au milieu.



CONCLUSIONS

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTEGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

- ❑ Du point de vue de conception et construction, une excellente ingénierie et une entreprise géotechnique experte et compétente sont facteurs clé pour un projet de congélation de succès.
- ❑ Un bon choix des matériels et matériaux et de la méthode d'installation peuvent être très utiles pour éviter des ruptures des tubes congélateurs et du circuit principal.
- ❑ Un bon choix de (a) la dimension des tubes congélateurs et (b) la dimension mutuelle entre diamètre extérieur et intérieur des leurs tuyaux, (c) la dimension et les matériaux des conduites du circuit principal et leur insulation et (d) la transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte, peuvent être une aide précieuse pour augmenter l'efficace du système de congélation.



CONCLUSIONS

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. TUBES CONGÉLATEURS ET CIRCUIT DE DISTRIBUTION

- Conception des tubes congélateurs
- Installation des tubes congélateurs
- Transformation des tubes congélateurs avec la méthode mixte
- Conception du circuit de distribution

2. INTÉGRITÉ ET CONTINUITÉ DU MASSIF CONGÉLÉ

- Contrôle de la trajectoire réelle de tous les forages
- Scellement entre massif congelé et les structures existantes

4. CONCLUSIONS

- ❑ Le contrôle de la géométrie réelle du réseau de tubes congélateurs et des chaînes thermométriques et l'application à l'avance des mesures de précaution spécifiques pour améliorer le scellement entre massif congelé et éventuelles structures existantes sont essentiels pour assurer l'intégrité et la continuité de la structure provisoire en terrain congelé.
- ❑ Le scope de ces recommandations est seulement de donner des instruments qui puissent améliorer la probabilité de succès technique et dans le même temps réduire les coûts et la durée de construction.



QUELQUES CONSIDÉRATIONS PRATIQUES AU SUJET DES MATÉRIELS ET MÉTHODES DANS LA CONGÉLATION ARTIFICIELLE DES SOLS

Vittorio Manassero (UNDERGROUND CONSULTING, Pavia, Italie)
v.manassero@undergroundconsulting.it

www.undergroundconsulting.it

Merci

Questions ?



UNDERGROUND
CONSULTING

LA CONGÉLATION _ ARTIFICIAL FREEZING OF SOILS IN CIVIL ENGINEERING
VITTORIO MANASSERO - QUELQUES CONSIDÉRATIONS PRATIQUES AU SUJET DES MATÉRIELS
ET MÉTHODES DANS LA CONGÉLATION ARTIFICIELLE DES SOLS _ NOVEMBER 17TH 2023

 cfms