

LA CONGÉLATION DES SOLS - ARTIFICIAL GROUND FREEZING, *IN CIVIL ENGINEERING* INTRODUCTION A LA CONGELATION DES SOLS

UN PEU D'HISTOIRE ...

Un peu d'histoire ...

- 1834** – Première machine frigorifique développée par Perkins.
- 1852** – Sur le point d'excaver un puits de mine dans un sol instable et saturé lors d'un hiver très vigoureux, des ingénieurs français découvrent les propriétés intéressantes des sols congelés (hydrauliques et mécaniques).
- 1862** – Premier projet connu de congélation de sol visant à renforcer et étancher un sol dans le but d'excaver un puits de mine au Pays de Galles. La congélation est réalisée avec une saumure circulant dans des forages.
- 1883** – La méthode de congélation des sols appliquée au fonçage des puits dans le rocher est brevetée par l'ingénieur minier allemand Hermann POETSCH.

A ces débuts, les congélations des sols est utilisée essentiellement pour passer les niveaux aquifères lors du fonçage des puits de mine. Ce n'est que plus tard que la méthode se diversifie dans les domaines de la géotechnique (tunnels notamment) pour le traitement des sols meubles aquifères.
- 1908** – Congélation de sol pour la réalisation de la ligne 4 du métro parisien, première ligne à passer sous la Seine.
- 1950** – Record du monde pour une congélation réalisée depuis la surface jusqu'à 900m de profondeur pour la réalisation d'un puits de mine au Canada.

Un peu d'histoire ...

- 1962** – Jusque-là, la congélation des sols était faite d'essais et d'erreurs (parfois fatales). La conception et les outils informatiques faisaient défaut. Le sol gelé est un matériau complexe dont les propriétés dépendent à la fois de la température et du temps. Sur la base d'une grande expérience du pergélisol (permafrost), Vyalov et. Al. Publie un modèle empirique. Plus tard, bien d'autres sont apparus (Sanger and Sayles – 1979, ...)
- 1962** – Evolution de la technique avec la première utilisation de l'azote liquide en France.
- 1978** – Afin de partager les retours d'expériences, de développer et de faire évoluer la technique de congélation de sols, le professeur H. L. Jessberger a organisé le premier symposium international sur la congélation du sol à Bochum, en Allemagne.
- 2006** – Le symposium a été renouvelé tous les 3 ans jusqu'en 2006.
- 2023** – Après 16 ans d'absence, une nouvelle édition a été organisée à Londres il y a quelques semaines.

- ISGF'78: Bochum, Germany
- ISGF'80: Trondheim, Norway
- ISGF'82: Hanover, USA
- ISGF'85: Sapporo, Japan
- ISGF'88: Nottingham, UK
- ISGF'91: Beijing, China
- ISGF'94: Nancy, France
- ISGF'97: Luleå, Sweden
- ISGF'00: Louvain-la-neuve, Belgium
- ISGF'06: Maine, USA

A titre de comparaison :

- | | |
|------------------------|--|
| - Injection des sols : | Invention 1802 (Berigny) – essor 1920-1930 |
| - Jet-grouting : | Développer dans les années 1960-1970 |
| - Soilmixing : | Développer dans les années 1950-1960 |
| - Paroi moulée : | Développer dans les années 1950 |

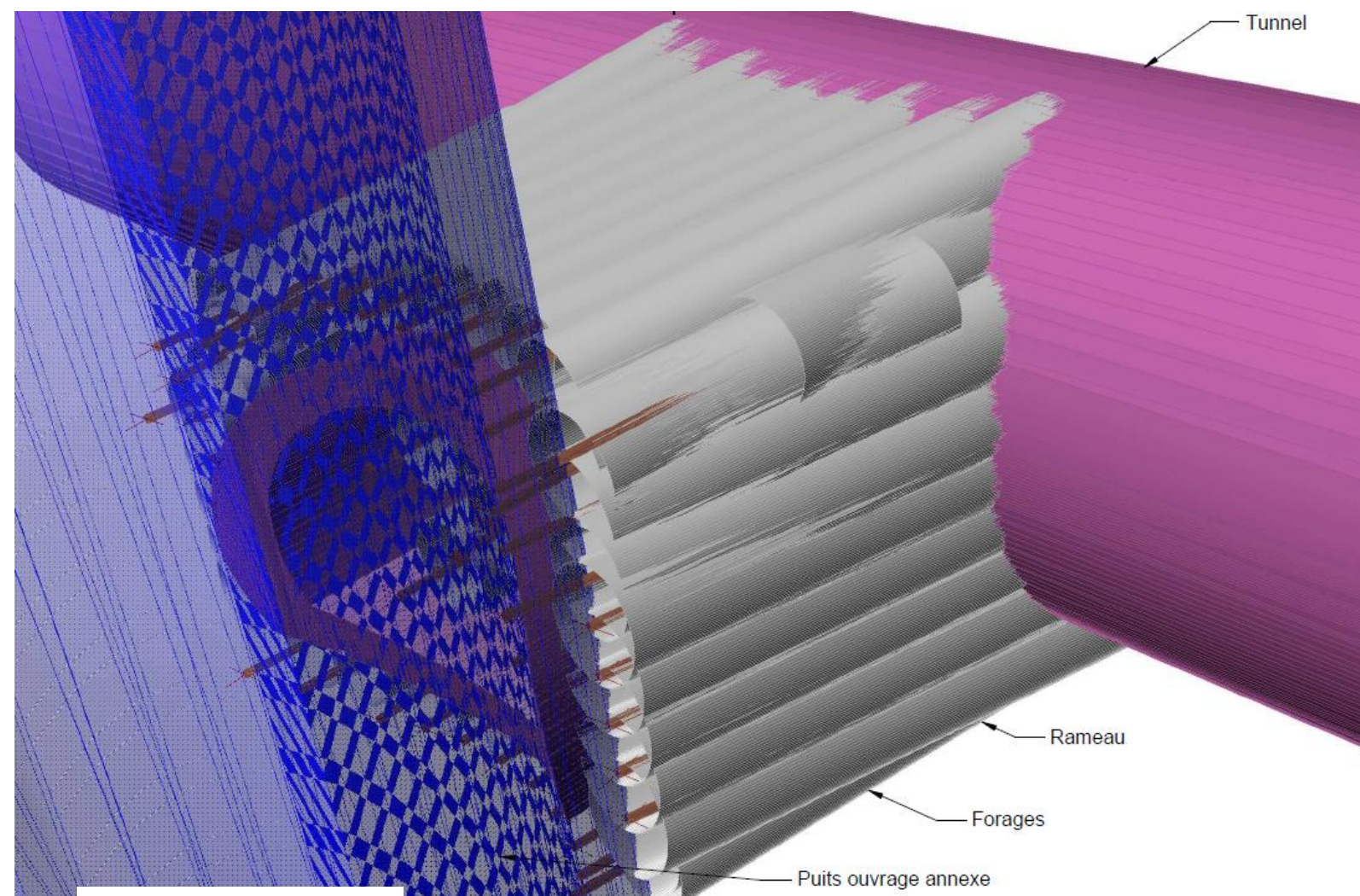
Quand utiliser la congélation des sols ...

(En géotechnique)

Quand utiliser la congélation des sols ...

Ces dernières décennies, la congélation des sols a évolué. Elle est utilisée de nos jours dans une grande variété de projets d'ingénierie complexes où la stabilité et la gestion des eaux souterraines représentent une problématique :

- Mine / Puits de mine ;
- Tunnel (BI/BO, rameaux, ...) ;
- Coupures étanches (confinement de contamination, ...) ;
- Soutènement ;
- Reprise en sous-œuvre ;
- ...



Quand utiliser la congélation des sols ...

La congélation est employée principalement pour traiter les sols (mais les roches aussi) dont les caractéristiques ne permettent pas d'envisager une autre technique plus conventionnelle et sans doute moins onéreuse telle que l'injection, le jet-grouting ou encore le solmixing.

Elle est le plus souvent mise en œuvre sous nappe afin de gérer les risques de venue d'eau et/ou de débouillage et ou de stabilité d'excavation.

La congélation des sols permet :

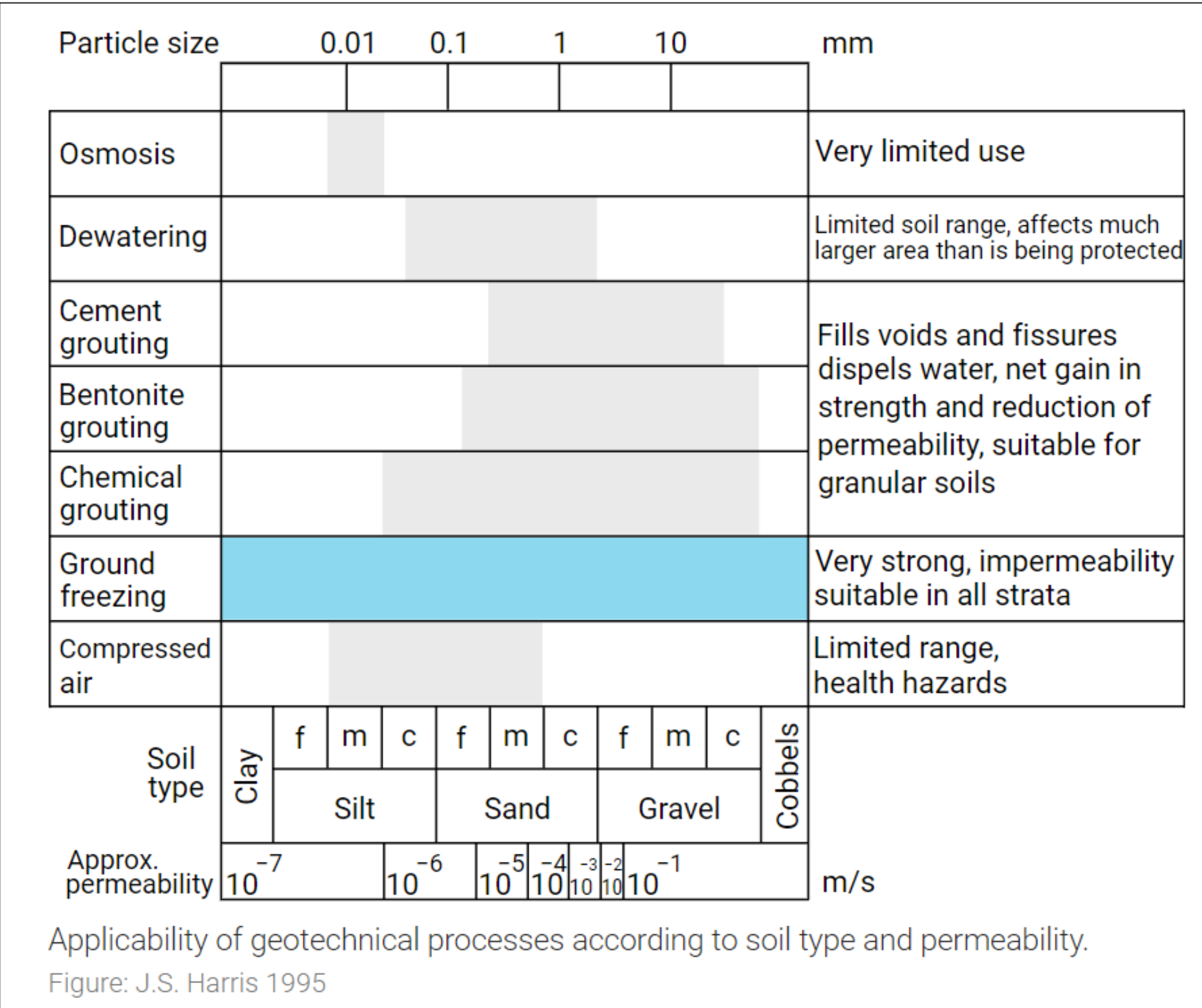
- L'amélioration des caractéristiques mécaniques (limitation des tassements, stabilisation, ...) ;
- L'étanchement du sol => on parle bien d'étanchement dans le cas de la congélation (peu ou pas d'influence sur la nappe) ;

Elle peut être mise en œuvre dans tous les types de sols sans limitation (granulométriques, compacité, perméabilité, ...) sous certaines conditions (circulation de nappe, ...) => attention aux effets collatéraux en environnements sensibles.

La congélation des sols présente des avantages technico-environnementaux :

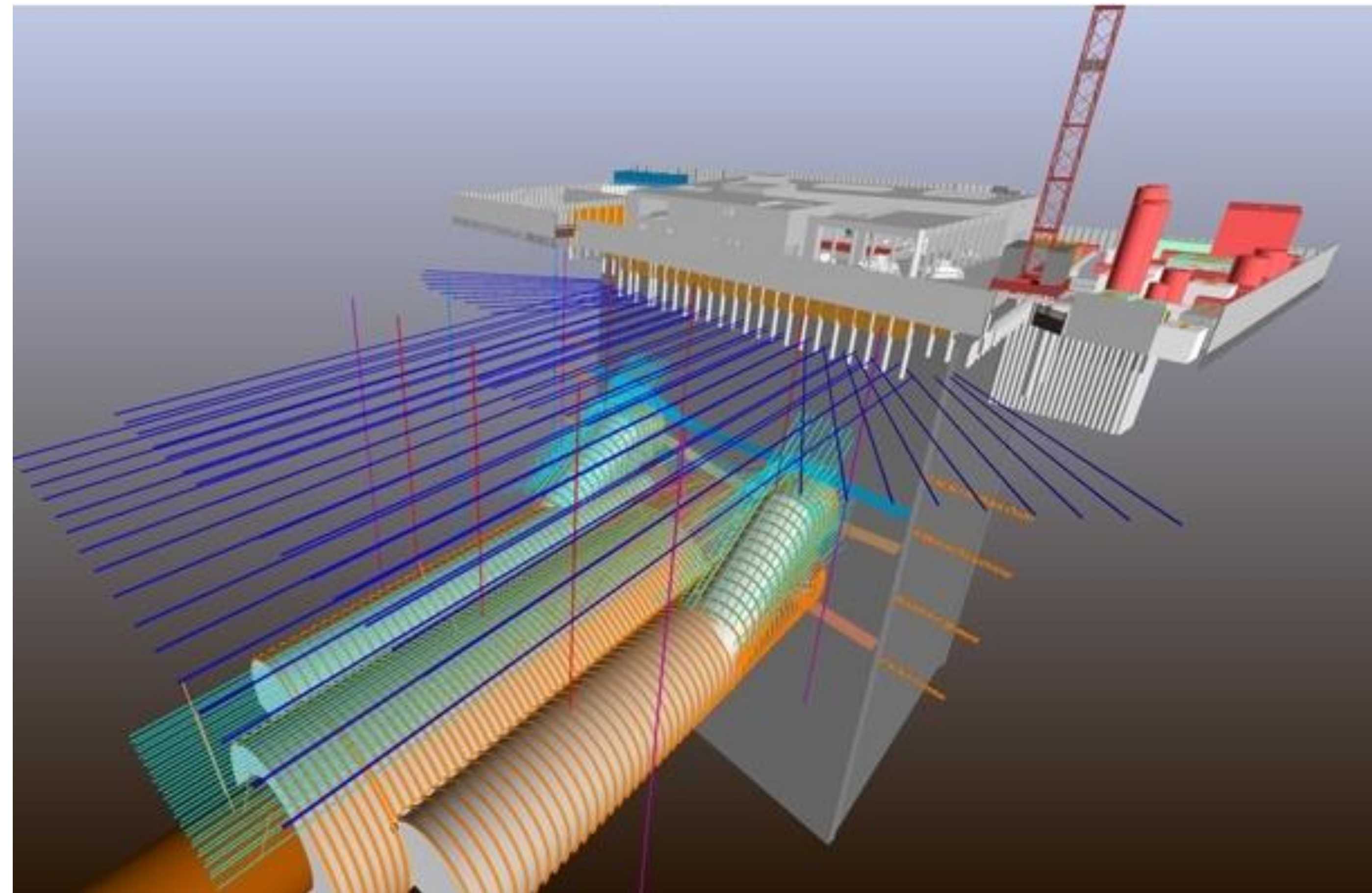
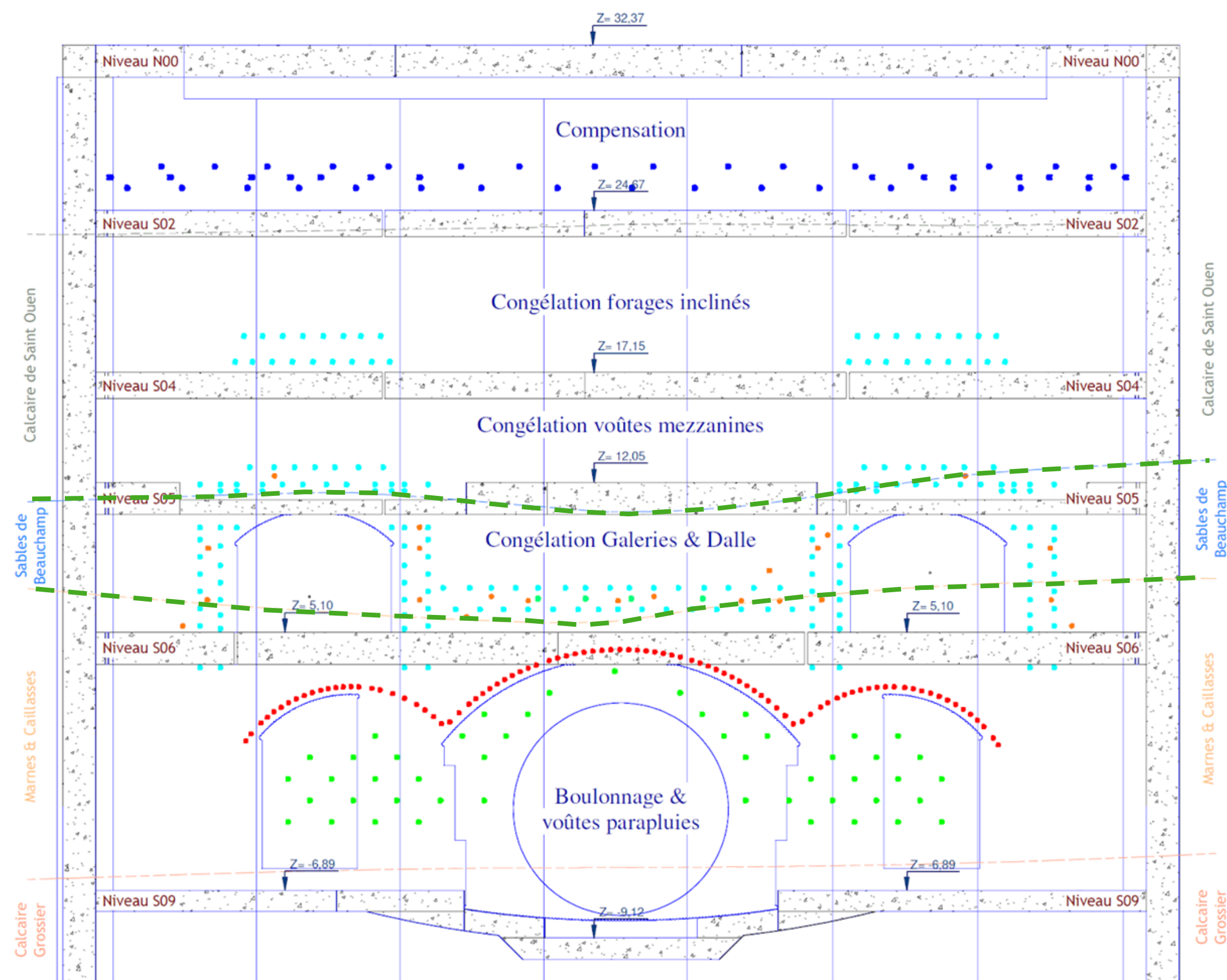
- Traitement de sol le plus souvent temporaire (rétablissement des écoulements de nappe, ...) ;
- L'eau du terrain, une fois gelée, est utilisée comme matrice (Bilan carbone intéressant face à des solutions impliquant la mise en œuvre de ciment ou d'acier) ;

Néanmoins, la congélation est de plus en plus utilisée de manière permanente en combinaison avec les besoins en production de chaleur (Ex : congélation en guise de fondation VS besoins en chauffage du bâtiment => congélation = pompe à chaleur)



Quand utiliser la congélation des sols ...

Chantier de la gare du Vert de Maisons (T2A – Grand Paris Express)



Les étapes de la mise en œuvre ...

(Norme en cours)

Les différentes phases ...

Selon les pays, les approches peuvent être différentes (responsabilités). D'une manière générale, en France, un chantier de congélation passe par les étapes suivantes :

En amont

- Reconnaissances géotechniques et essais laboratoire
- Calculs thermiques/mécaniques et dimensionnement du dispositif de congélation

Travaux préparatoires

- Installation des congélateurs
- Montage et remplissage du circuit de distribution et de la centrale frigorifique
- Mise en place des dispositifs d'auscultation / contrôle

Congélation proprement dite

- **Mise en froid** = phase de développement de la glace jusqu'à atteinte des critères définis par les calculs (géométrie et température)
⇒ forte demande en puissance frigorifique
⇒ peu de risque si ce n'est planning (excepté risque l'azote)
- **Entretien** = phase de maintien de massif de glace (géométrie et température) pendant la réalisation des travaux
⇒ faible demande en puissance frigorifique
⇒ risque planning et sécurité important (intervention des ouvriers notamment)
⇒ nécessité de solutions de secours

L'après

- **Décongélation** = arrêt de la centrale frigorifique et fonte progressive du massif de glace. Suivi des tassements et remédiation si pertinent (environnement, sol)
- Démobilisation / cachetage des congélateurs

Les essais laboratoire ...

Le recours à la congélation ne s'improvise pas.

Avant de mener les calculs thermiques et mécaniques, il est nécessaire d'appréhender et de caractériser au mieux le sol à congeler.

Pour cela, il est nécessaire de réaliser une bonne campagne de reconnaissance avec notamment des prélèvements d'échantillons les plus intacts possible (sondages carottés) dans le but :

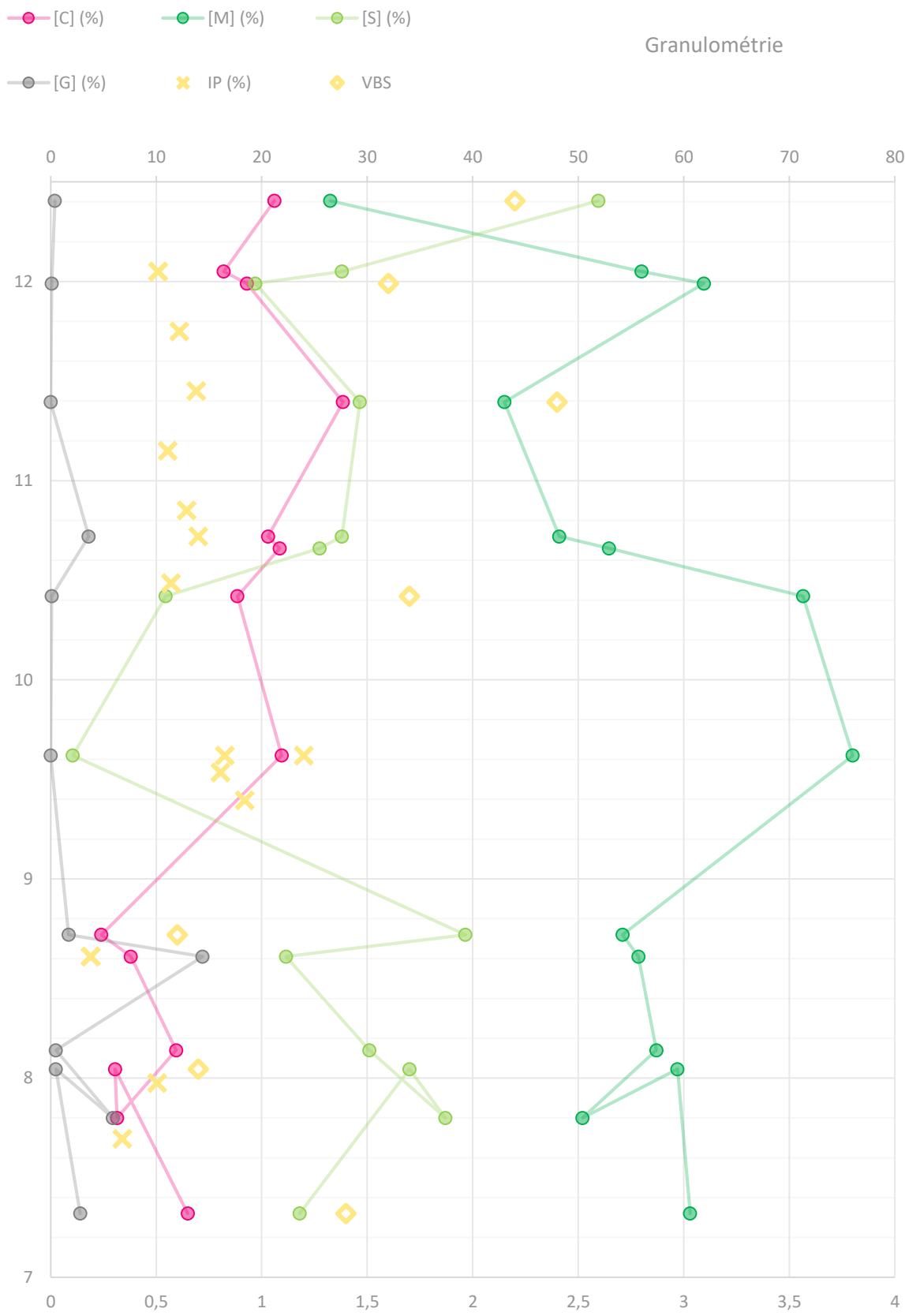
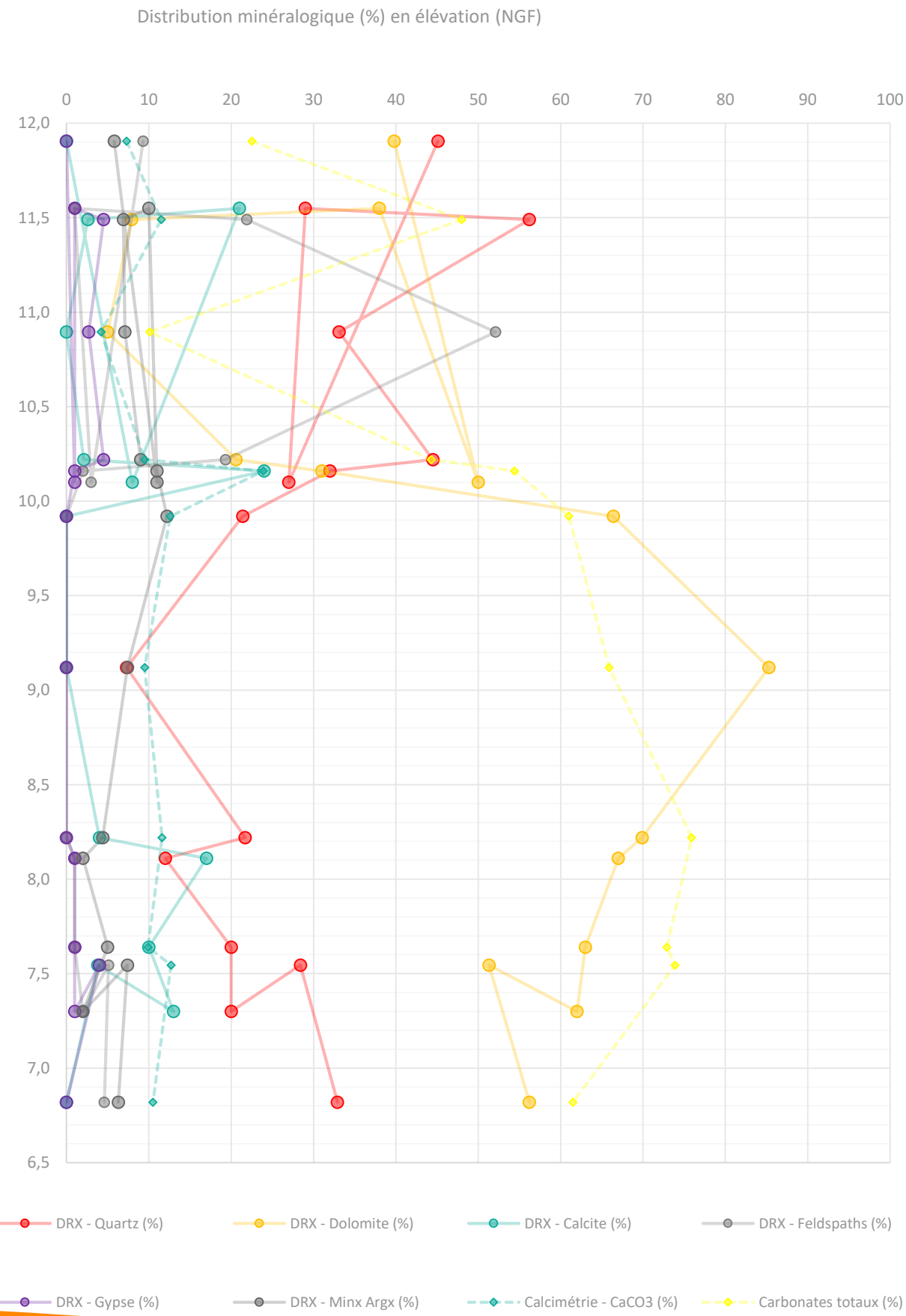
- De caractériser le sol et d'en déduire les caractéristiques thermiques
 - Granulométrie
 - Teneur en eau / densité / limite Atterberg
 - Salinité (Cl, SO4, HCO3) et alcalinité (Na, K, Ca, Mg) => **détermination du point de gel**
 - Minéralogie => **Capacité calorifique et conductivité thermique**
- De définir les caractéristiques mécaniques du sol congelé à différentes températures (-5°C, -10°C, -20°C)
 - Résistance à la compression simple et module de déformation
 - Essais triaxiaux
 - Essais de fluage uniaxial ou triaxial
 - Essais de « frost heave » ou de « frost pressure » => **détermination du potentiel de ségrégation**
 - Essais triaxiaux et compression simple sur sol décongelé

Test	Standard
Grain size distribution	DIN 18123: 2011-04
Moisture content	DIN EN ISO 17892-1:2015-03
Atterberg limits	DIN 18122: 1997-07
Specific gravity	DIN 18124: 2011-04
Density	DIN EN ISO 17892-2:2015-03
Uniaxial compression test (UCT)	ISGF (International Symposium on Ground Freezing): 2000
Triaxial compression test (TCT)	ISGF (International Symposium on Ground Freezing): 2000
Uniaxial creep test (UCT)	ISGF (International Symposium on Ground Freezing): 2000
Mineralogy	RFA-Method: DIN 51001: 2003-08 and DIN EN ISO 12677: 2009-07
Frost pressure	ASTM 5918 Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils
Frost heave	Referring to ASTM 5918 Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils
Freezing point	Following ASTM: D1177 - 12
Salinity	DIN 38414: 1984-10 DIN 38404: 2009-07 EN 27888: 1993-11 EN ISO 10304-1: 2009-07 DIN 38405: 1979-05 ISO 11885: 2009-09/ISO 17294-2: 2005-02

Extrait rapport CDM pour chantier T2A

Les essais laboratoire ...

Granulométrie et minéralogie



Les essais laboratoire ...

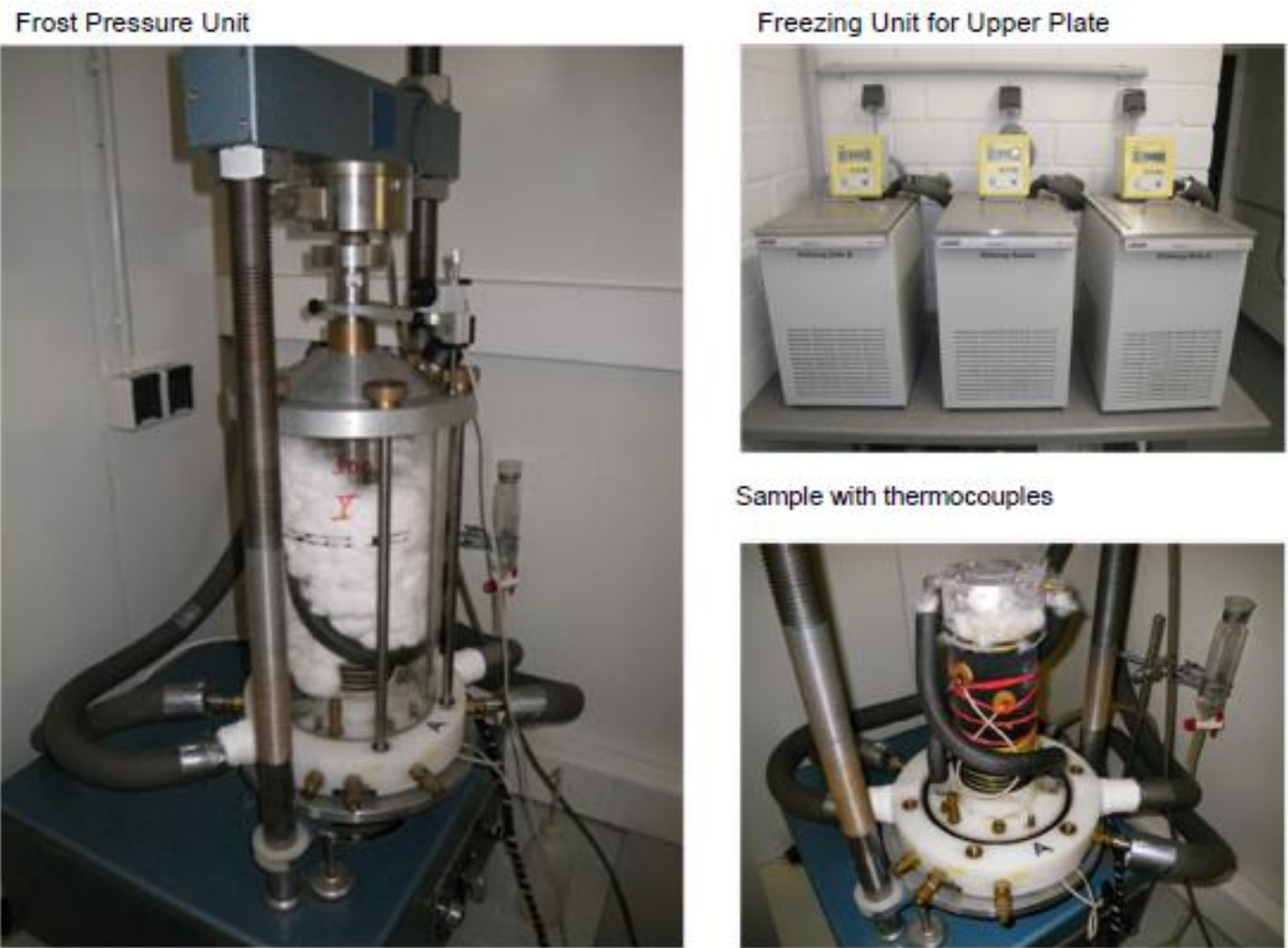
Différents essais « mécaniques »

UCS test



Uniaxial creeping test

Frost pressure test



Frost heave test

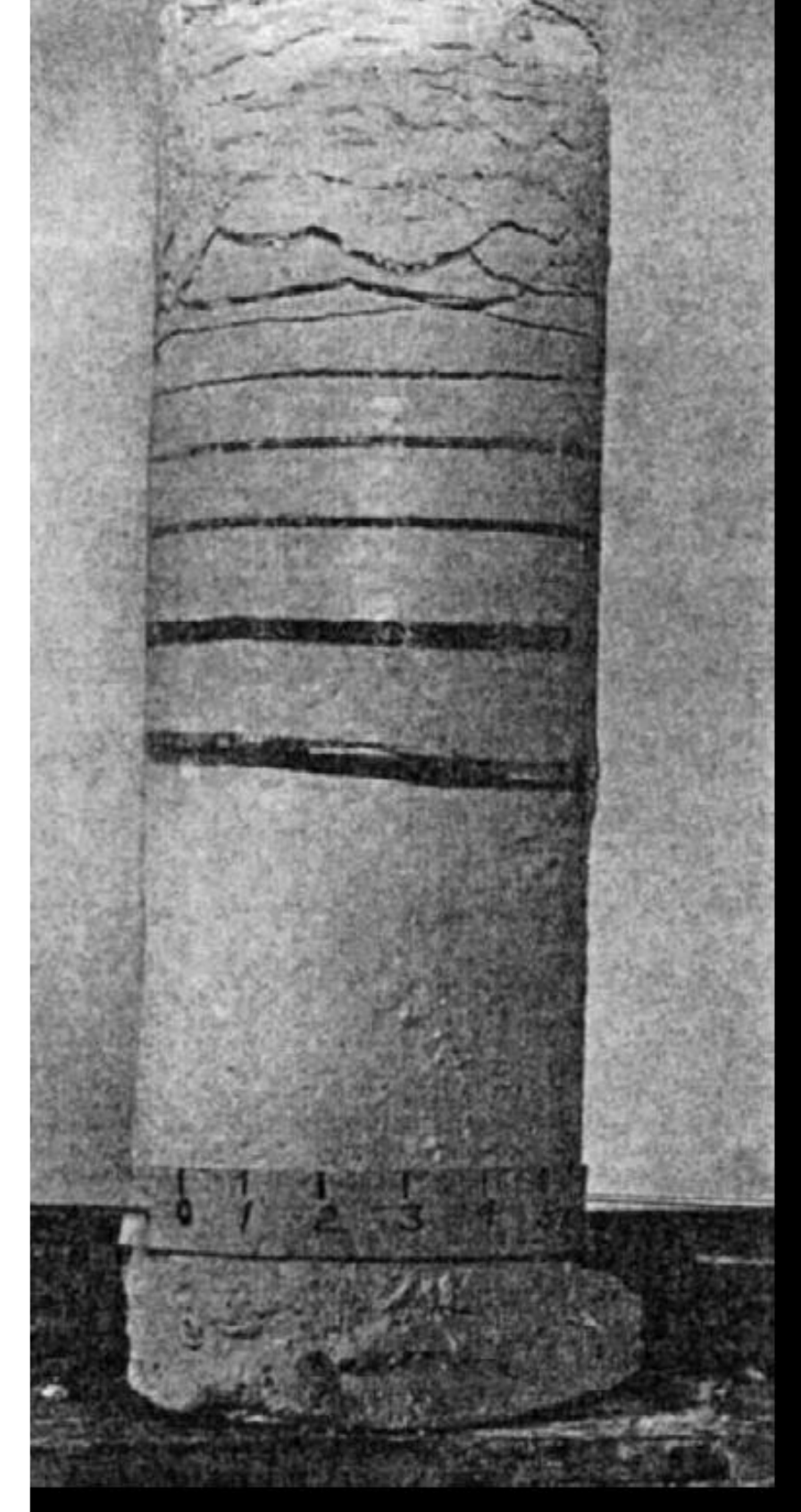
Les essais laboratoire ...

Lorsqu'un sol gèle, les sources de déformation/gonflement proviennent de deux phénomènes majeurs :

- Le changement de phase de l'eau en glace => +9% x porosité du terrain
- La succion cryogénique (potentiel de ségrégation) => fait que le front de congélation (froid) attire l'eau du terrain amenant à la formation de lentilles de glace.

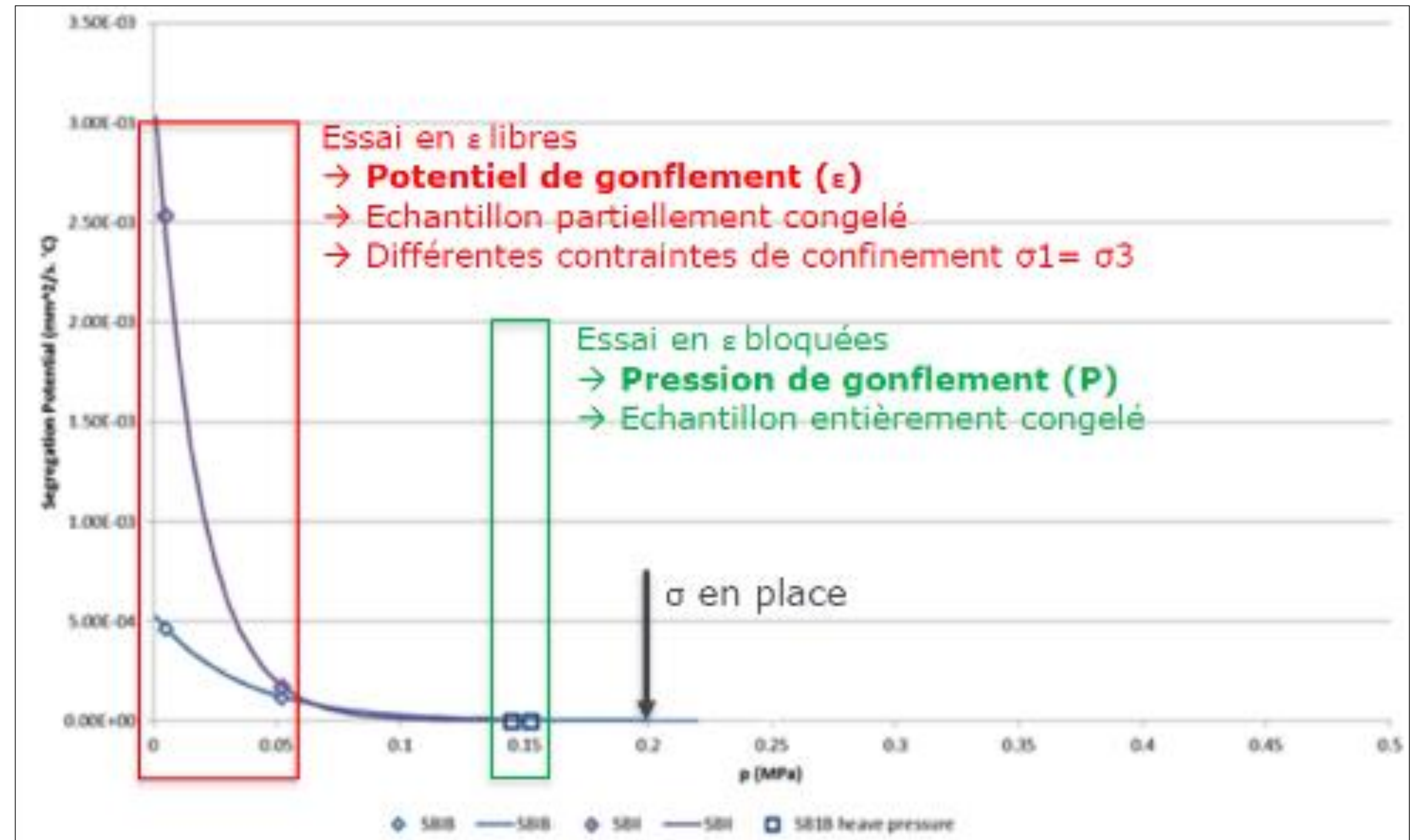
L'importance de ces deux phénomènes dépend de :

- La nature du terrain et sa teneur en eau
- La profondeur de la congélation => plus la profondeur sera importante et plus le « gonflement » sera contenu
- Le gradient de température dans le massif de glace.



Les essais laboratoire ...

Le potentiel de ségrégation :
(mm²/s x C°)



Le dimensionnement ...

A partir des données d'entrée issues des essais en laboratoire, les calculs thermiques et mécaniques sont menés (logiciels / modules spécifiques).

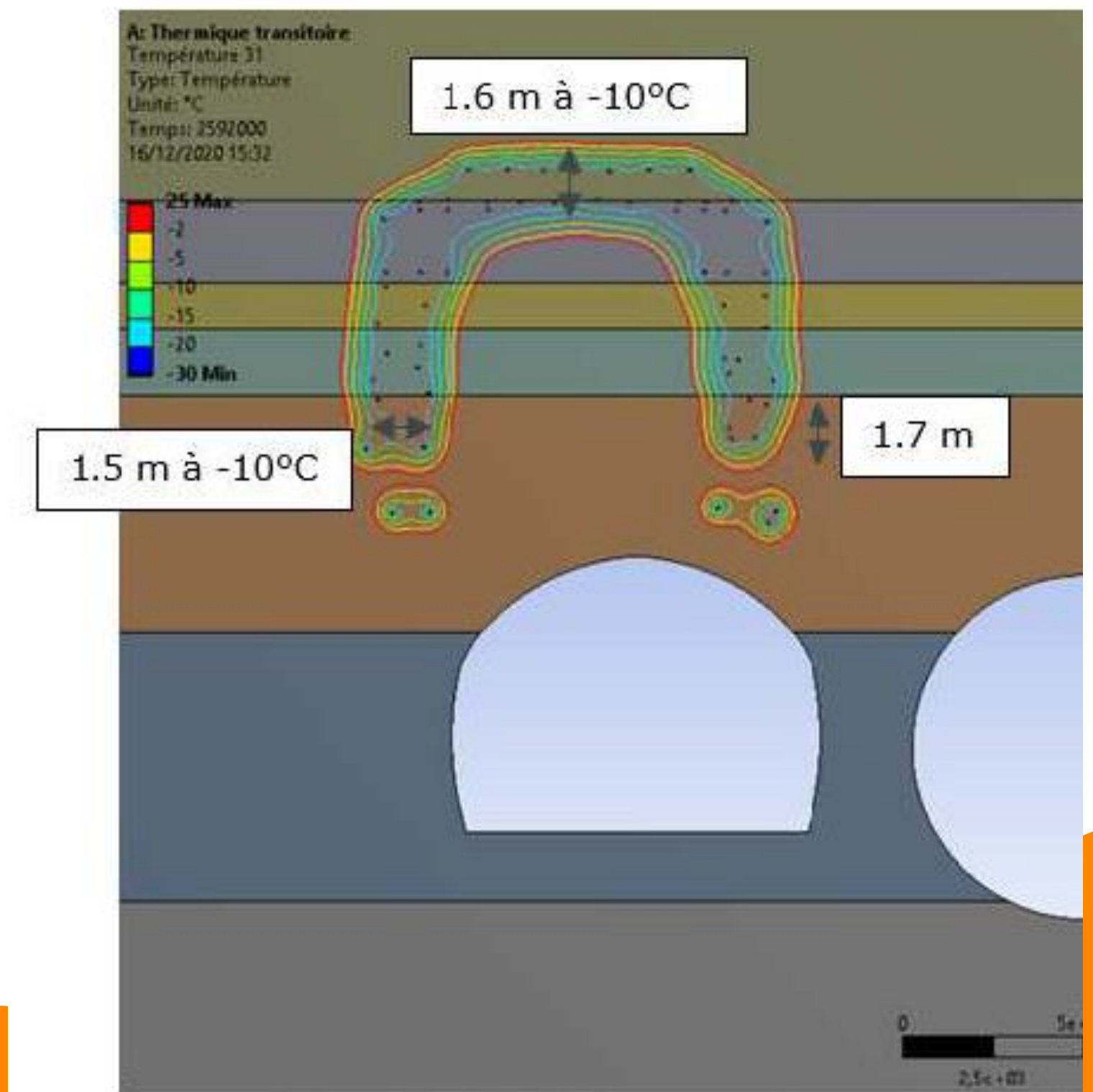
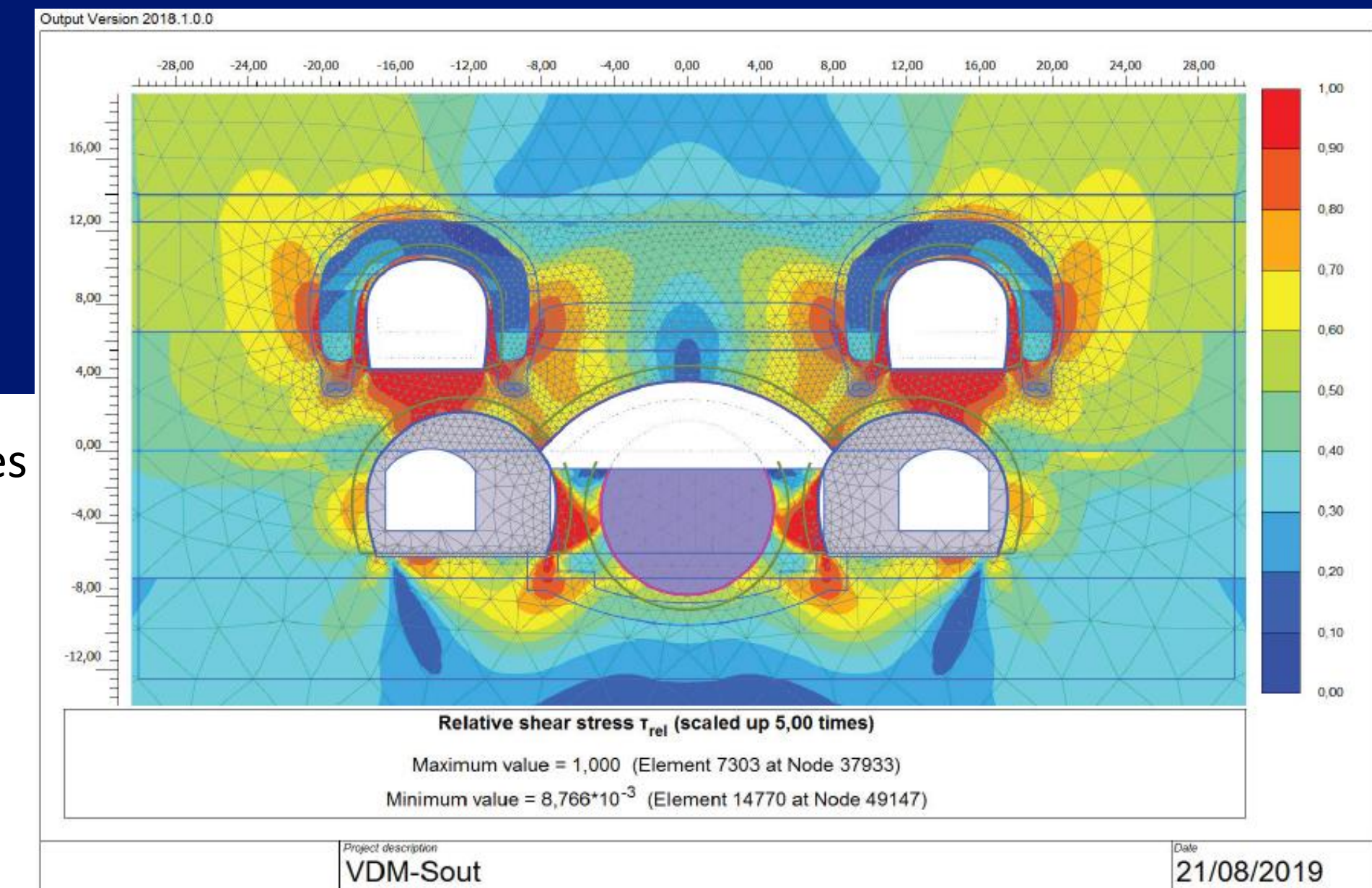
Ces calculs sont itératifs et menés en étroite collaboration avec les méthodes dont ils dépendent :

- Espacement des congélateurs (éventuellement imposé = dalle épaisse)
- Diamètres des congélateurs
- Déviations anticipées

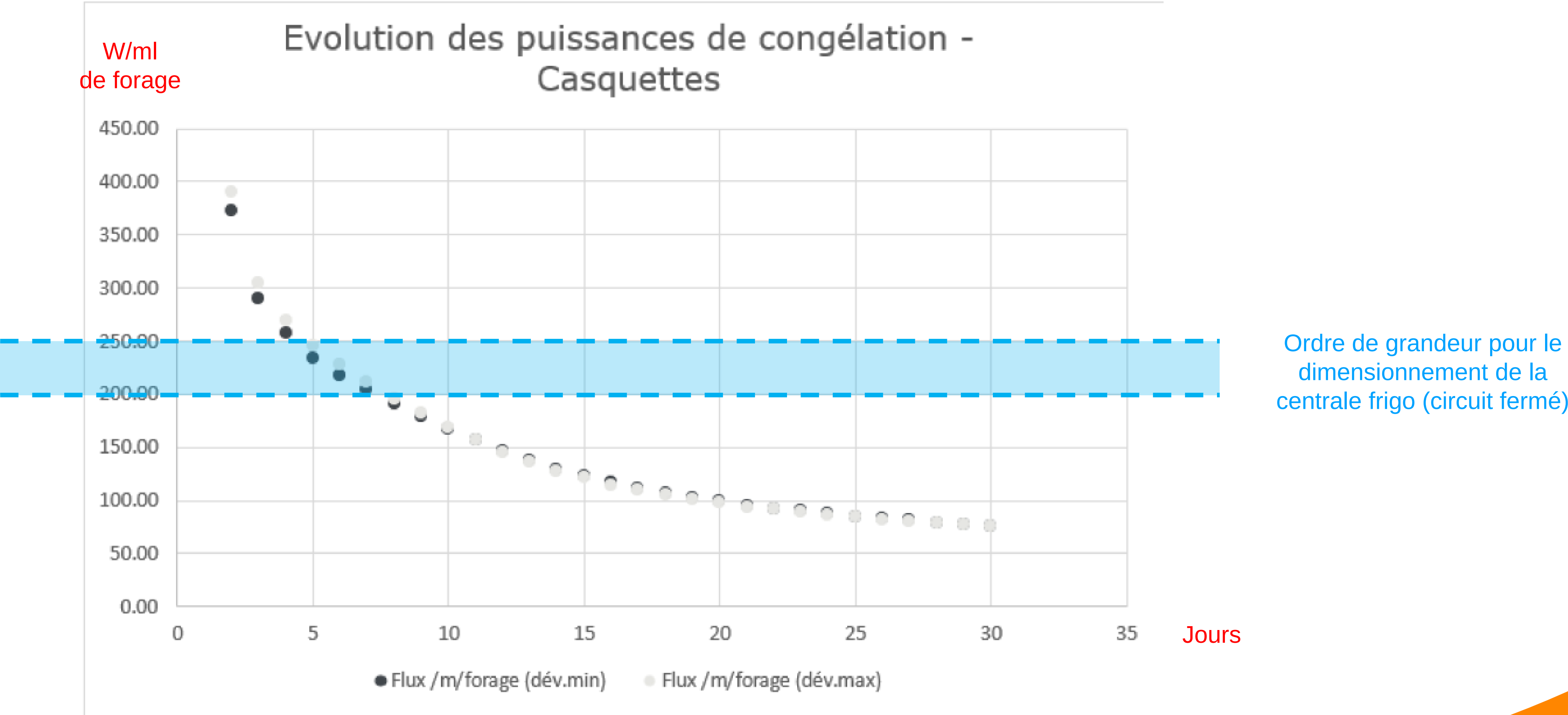
Lorsque le renforcement du sol est nécessaire, les calculs mécaniques permettent de définir la géométrie (épaisseur notamment) du massif / mur de glace nécessaire à la stabilité recherchée. Cette épaisseur est fixée généralement à une isotherme donnée (-10°C par exemple). Les calculs mécaniques intègrent les paramètres de fluage du sol congelé (différentes approches selon les pays).

Les calculs thermiques intègrent l'espacement des forages, leur diamètre, les possibles déviations (simulation) et les sources de chaleurs connues (circulation de nappe, engins de chantier, réseaux à proximité, ...) aux différentes phases des travaux. Ils permettent entre autres de :

- S'assurer que l'objectif d'épaisseur est atteignable avec la géométrie proposée pour les forages ;
- Estimer le temps nécessaire pour atteindre la géométrie nécessaire ;
- Vérifier le bon collage de la glace aux existants (paroi moulée, tunnel, ...) ;
- Définir les besoins en puissance frigorifique / consommation d'azote liquide ;



Le dimensionnement ...

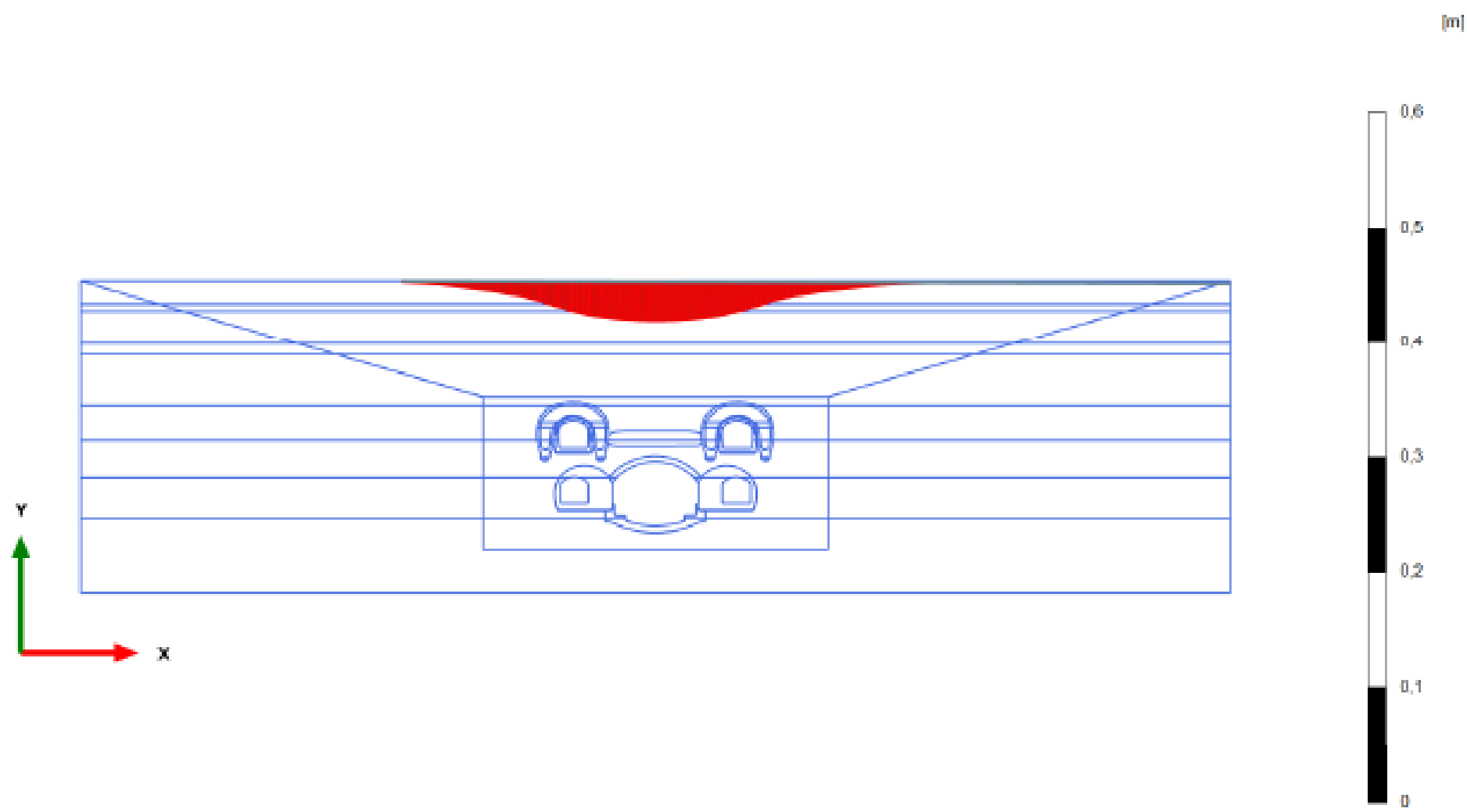
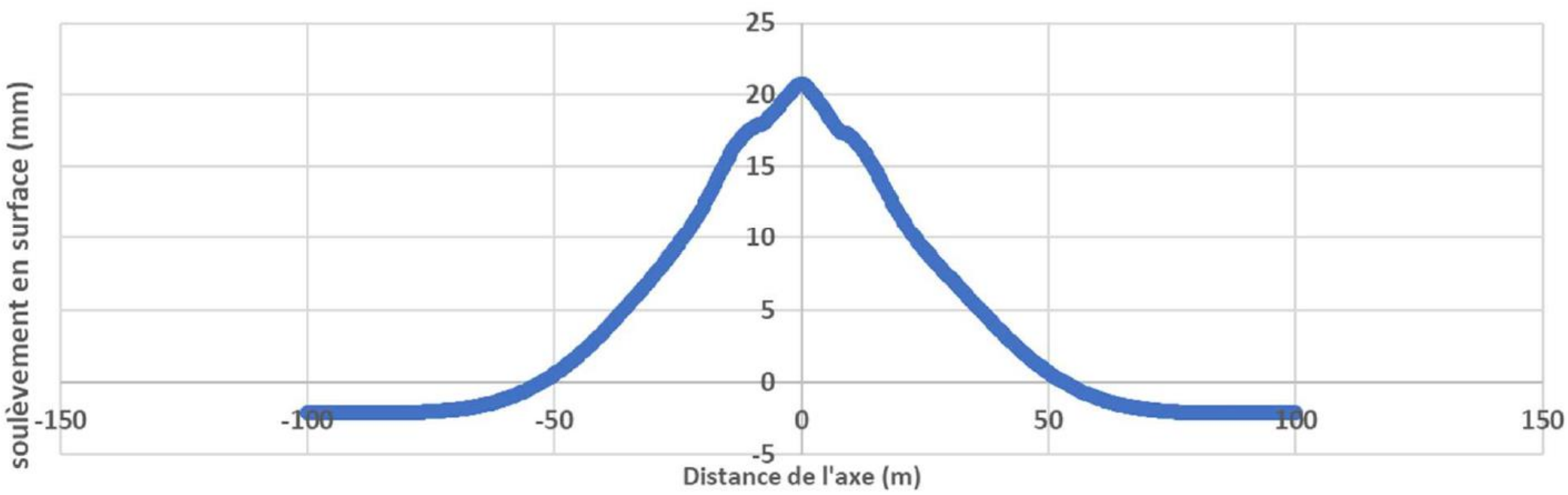


Le dimensionnement ...

Lorsque pertinents, des calculs poussés sont également menés pour :

- Apprécier l'impact de la congélation sur les existants (soulèvement / déformation des bâtiments réseaux, tunnel, paroi moulées, ...)
- Apprécier l'impact de la décongélation (baisse des caractéristiques mécaniques, tassements)

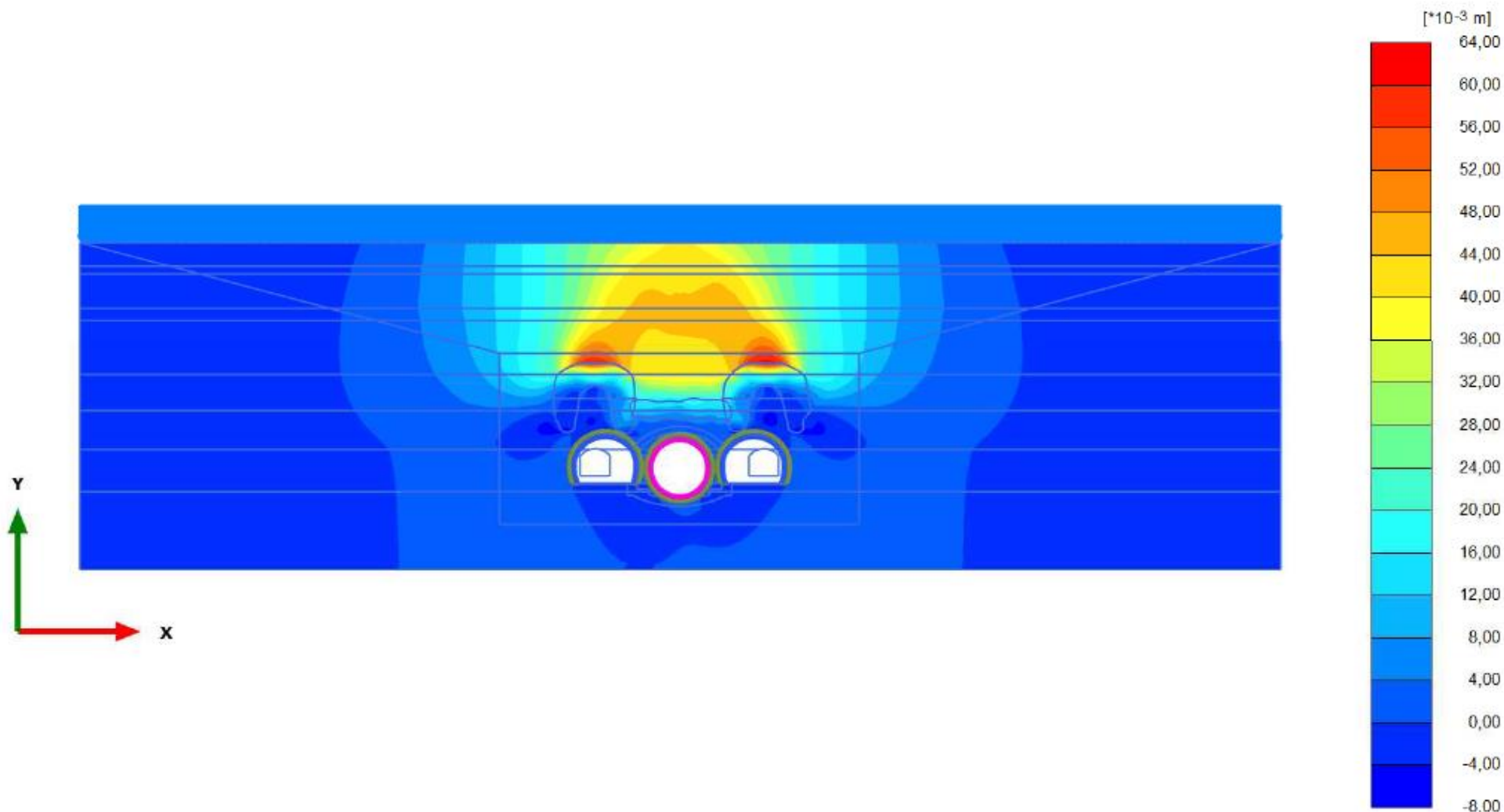
Soulevement en surface dû à la congélation des casquettes



Phase displacements Pu_y (scaled up 200 times)

Maximum value = $8,799 \times 10^{-6}$ m

Minimum value = $-0,03439$ m

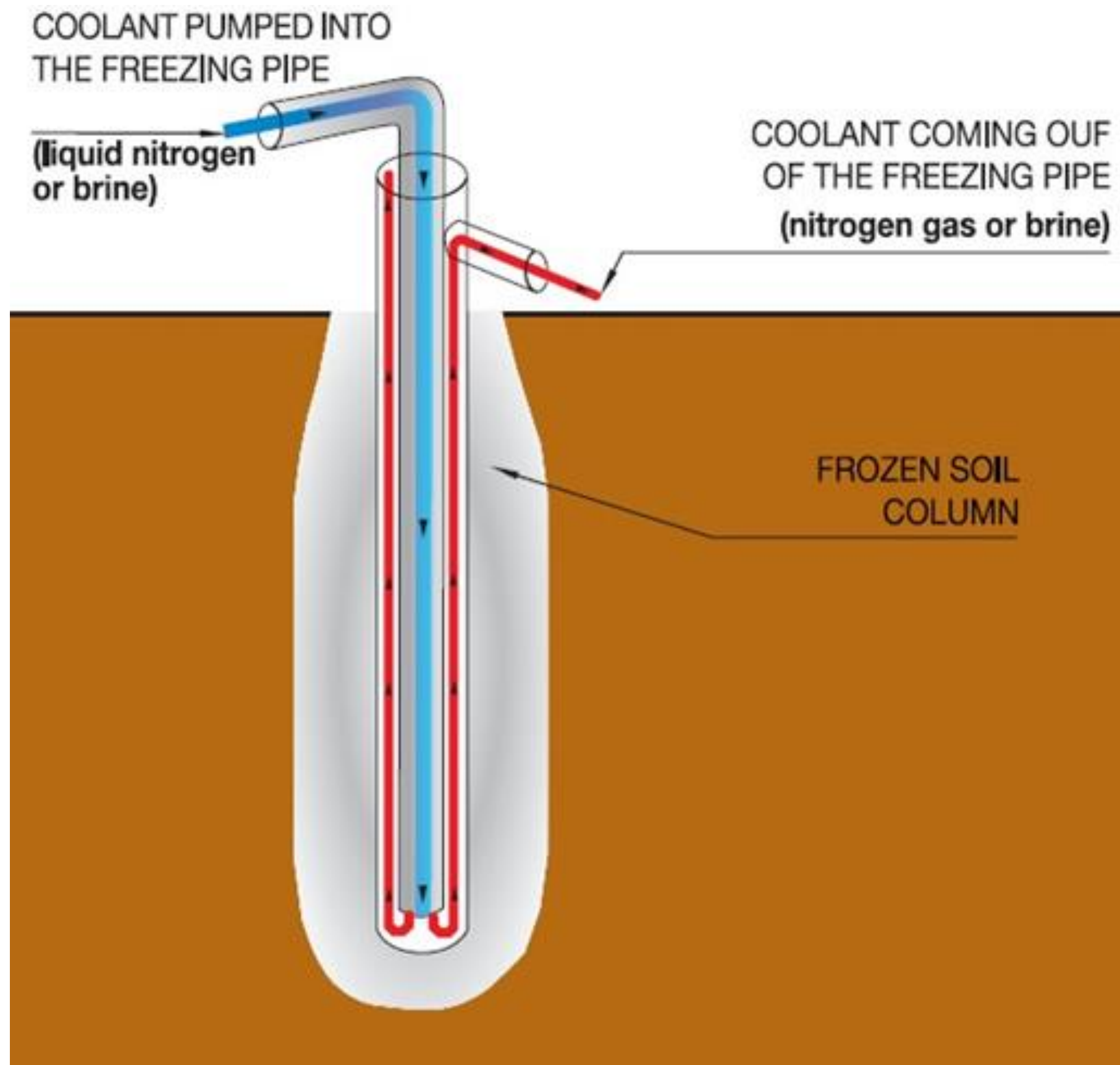


Phase displacements Pu_y (scaled up 50,0 times)

Maximum value = 0,06266 m (Element 4912 at Node 54797)

Minimum value = $-6,603 \times 10^{-3}$ m (Element 8057 at Node 45461)

Les congélateurs ...



Les congélateurs sont mis en œuvre dans le terrain par foration généralement. Néanmoins, différentes approches existent.

Les congélateurs sont souvent scellés au terrain sans que cela ne constitue une disposition impérative. Il est parfois même préférable de ne pas sceller les congélateurs sur toute leur longueur.

Chaque congélateur est constitué d'un tube extérieur et d'un tube intérieur permettant la circulation du fluide caloporteur en charge d'extraire les calories du terrain. D'autres configurations de congélateurs existent. Le choix de la configuration dépend des conditions de chantier.

Les matériaux utilisés sont également dépendant du mode de congélation retenu. On retrouve entre autres :

- Azote liquide : Acier, Inox ou cuivre
- Saumure : PEHD, Acier, Acier bas taux de carbone

Les méthodes de congélation ...

Méthode indirecte ou en circuit fermé

- fluide caloporteur : Saumure (CaCl₂ / NaCl) ou Temper
- Fluide caloporteur refroidi par des groupes frigorifiques
- Fluide frigorigène : R507, Ammoniaque, CO₂, ...
- Température de la saumure : -15 à -40°C

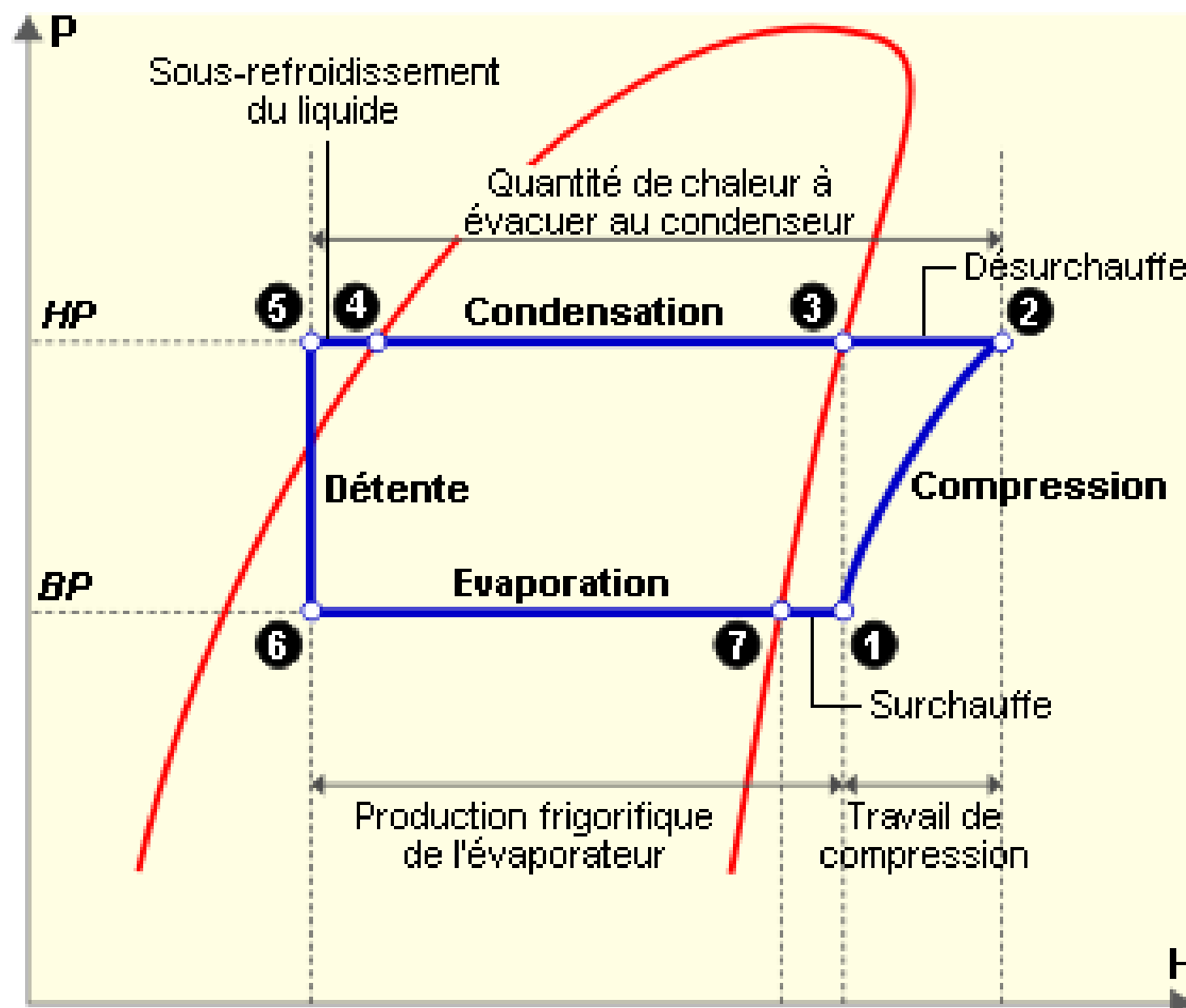
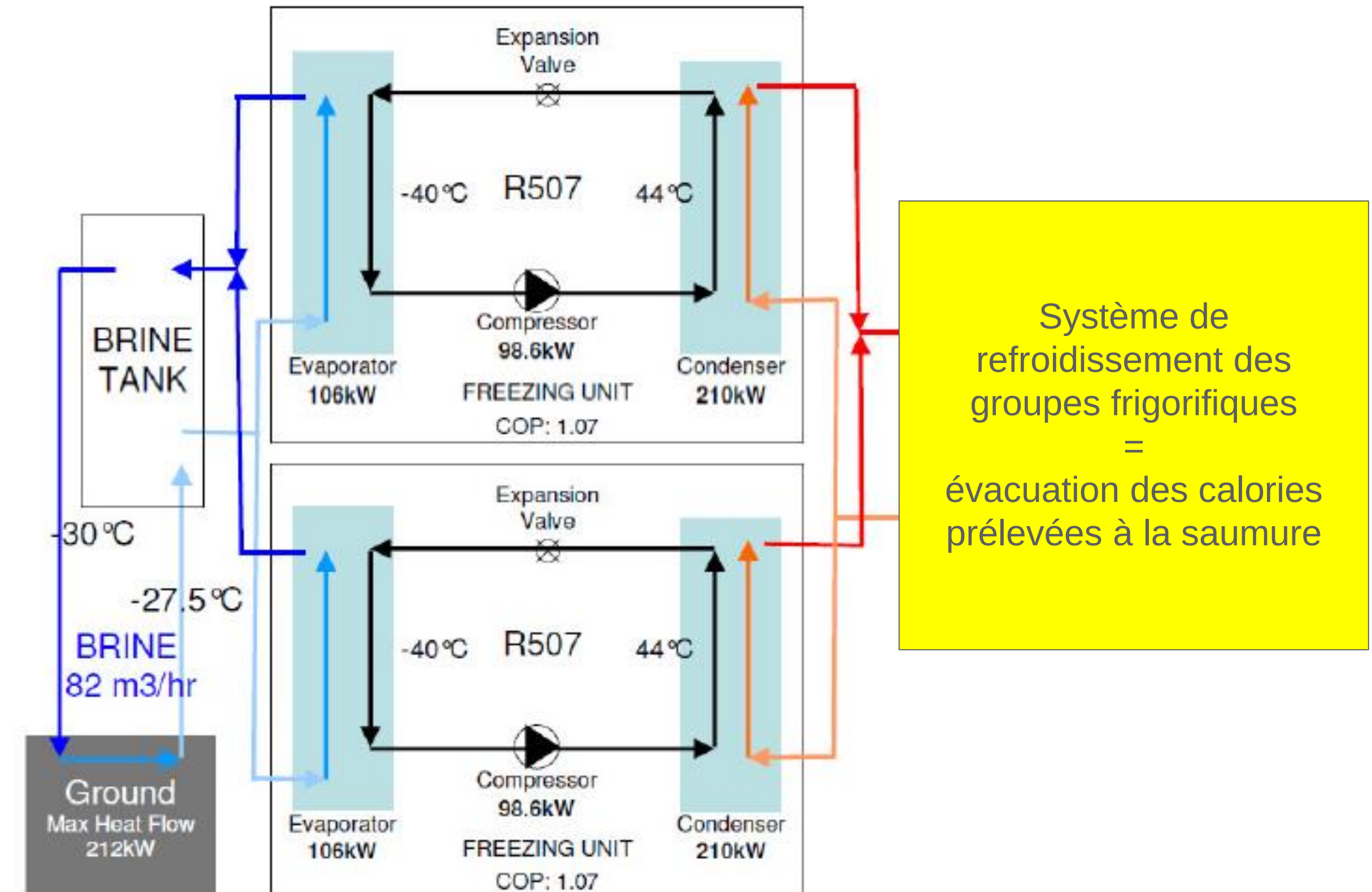


Diagramme Pression-enthalpie du fluide frigorigène

Bilan énergétique

$$\begin{aligned} &\text{Puissance électrique au compresseur} \\ &+ \\ &\text{Puissance frigorifique (évaporateur)} \\ &= \\ &\text{Puissance à évacuer au condenseur} \end{aligned}$$



Les méthodes de congélation ...

Méthode indirecte ou en circuit fermé

Les dispositifs de dissipation des calories dans l'atmosphère.

Grande importance car conditionne l'efficacité du groupe frigorifique.

Une mauvaise évacuation des calories = baisse de puissance du groupe.

- Tour de refroidissement
(légionellose = traitement spécifique régulier)
- Groupes frigorifique étagés (6-10°C)
- Circuit ouvert d'eau froide
- Groupe auto réfrigéré (aérocondenseur)



Les méthodes de congélation ...

Méthode indirecte ou en circuit fermé



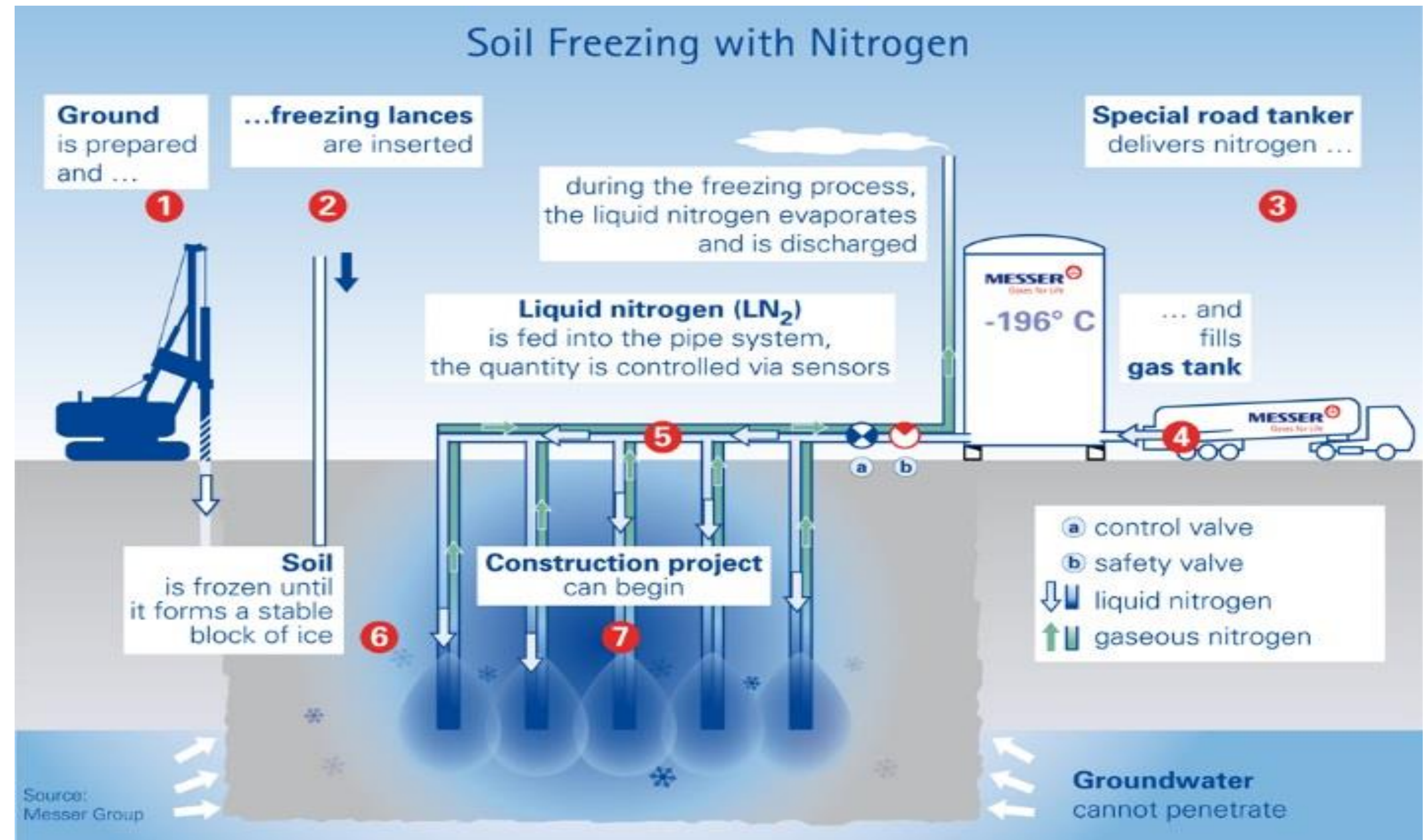
Les méthodes de congélation ...

Méthode directe ou en circuit ouvert

- fluide caloporteur : Azote liquide (LN₂)
- Température de la saumure : -196°C (liquide) à -70/-100°C gazeux
- Extraction des calories du sol avec changement de phase de l'azote liquide en azote gazeux
- Dissipation de l'azote gazeux dans l'atmosphère (78% de N₂)

60% de l'énergie apportée par l'azote provient de l'évaporation, les 40% restants proviennent du réchauffement du gaz.

Le débit d'azote est ajusté pour obtenir une température de sortie du gaz entre -70°C et -100°C.



Les méthodes de congélation ...

Avantages et inconvénients des 2 méthodes

A noter que les 2 méthodes peuvent être combinées

SAUMURE

- Moins coûteux
- Mise en froid lente (1-2 mois)
- + de soulèvements (débat)
- Moins dangereux
- Problématique des pertes de saumure dans le sol
- Très sensible aux déviations de forage
- Température plus homogène
- Séries jusqu'à 100m
- Vitesse de circulation de l'eau de nappe < 2-3m/j

AZOTE

- Plus coûteux (azote + matériaux + télémétrie)
- Logistique complexe sur les gros chantiers (livraison azote)
- Mise en froid rapide (1 semaine)
- - de soulèvements (débat)
- Dangereux (mortel) => sécurité (pression, asphyxie) => Coactivité
- Sensible aux déviations de forage
- Entretien plus difficile à gérer
- Température hétérogène
- Séries jusqu'à 50m
- Vitesse de circulation de l'eau de nappe < 10-20m/j

Les contrôles ...

En congélation des sols, les contrôles sont nombreux et menés à différents niveaux pour assurer le bon déroulement et la sécurité du chantier. On distingue les contrôles suivants :

- Contrôle / monitoring de la centrale frigorifique
- Contrôle / Monitoring du circuit de distribution
- Contrôle / Monitoring dans le terrain

Tous ces contrôles sont d'une grande importance. Ils permettent de piloter la congélation et d'anticiper toute anomalie nécessitant des actions afin de maintenir les critères issus du calcul. La redondance est généralement de mise.

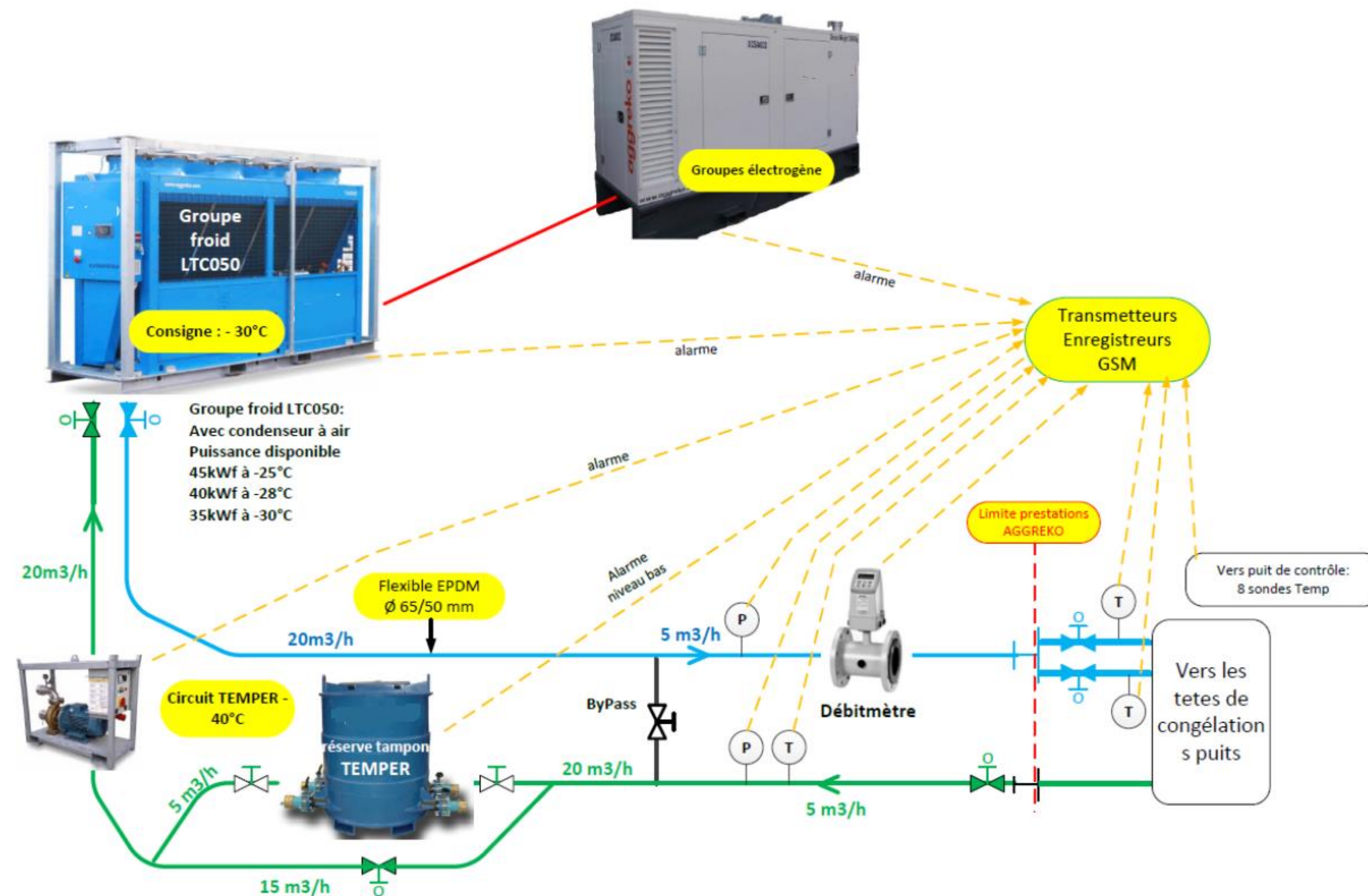
A partir de ces contrôles, il est possible par exemple de définir :

- Des seuils (épaisseur, température, déformation) de pilotage (vigilance, alerte, arrêt)
- Des actions à mettre en œuvre à l'atteinte de chacun des seuils
 - Changement de température de la saumure
 - Mise en place d'une intermittence
 - Ajustement du nombre de congélateurs
 - Ajustement du débit du fluide caloporteur
 - ...
 - A l'extrême arrêt de chantier / remblaiement / ...



Les contrôles ...

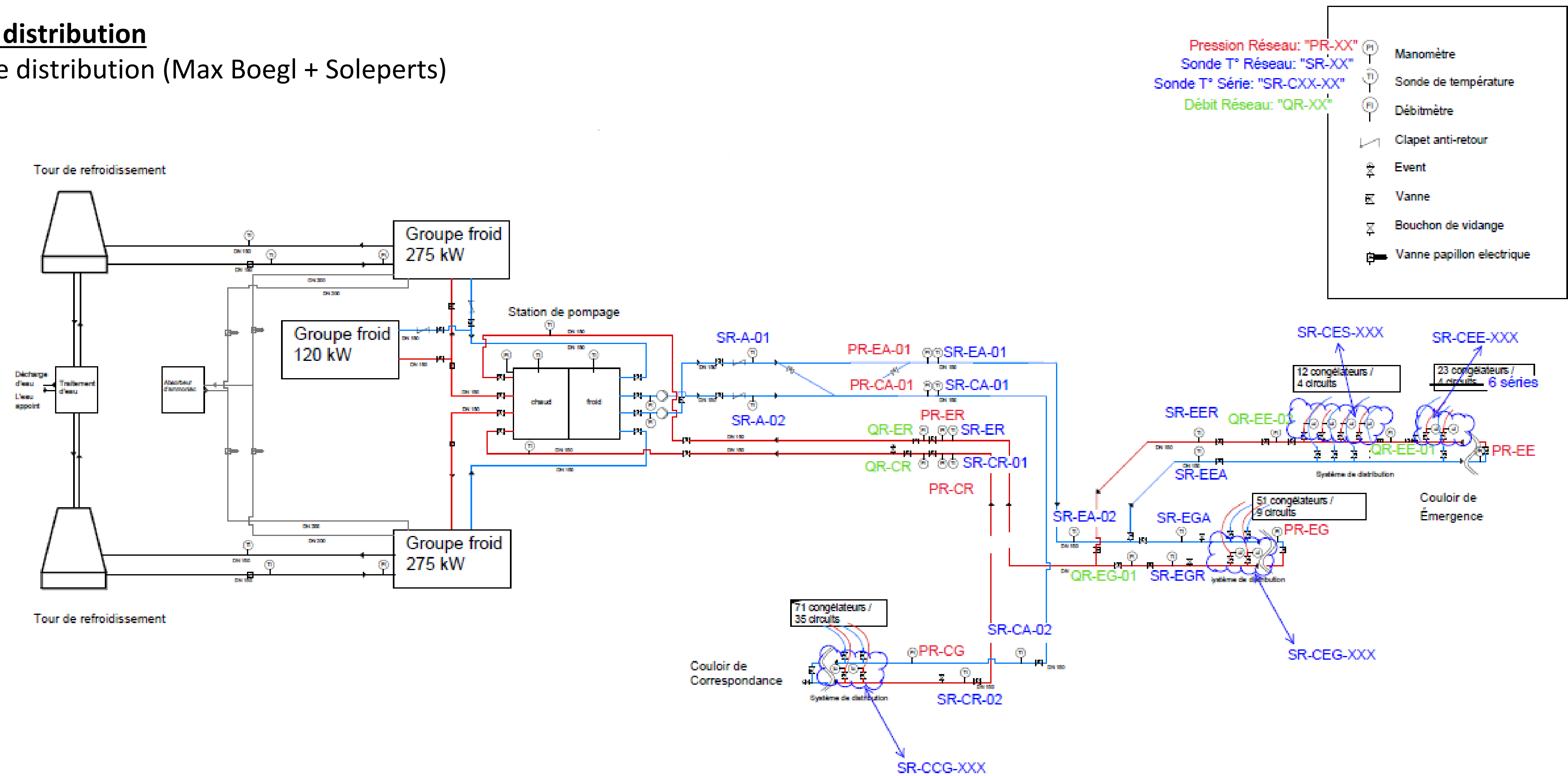
Contrôle / monitoring de la centrale frigorifique



Les contrôles ...

Contrôle sur le circuit de distribution

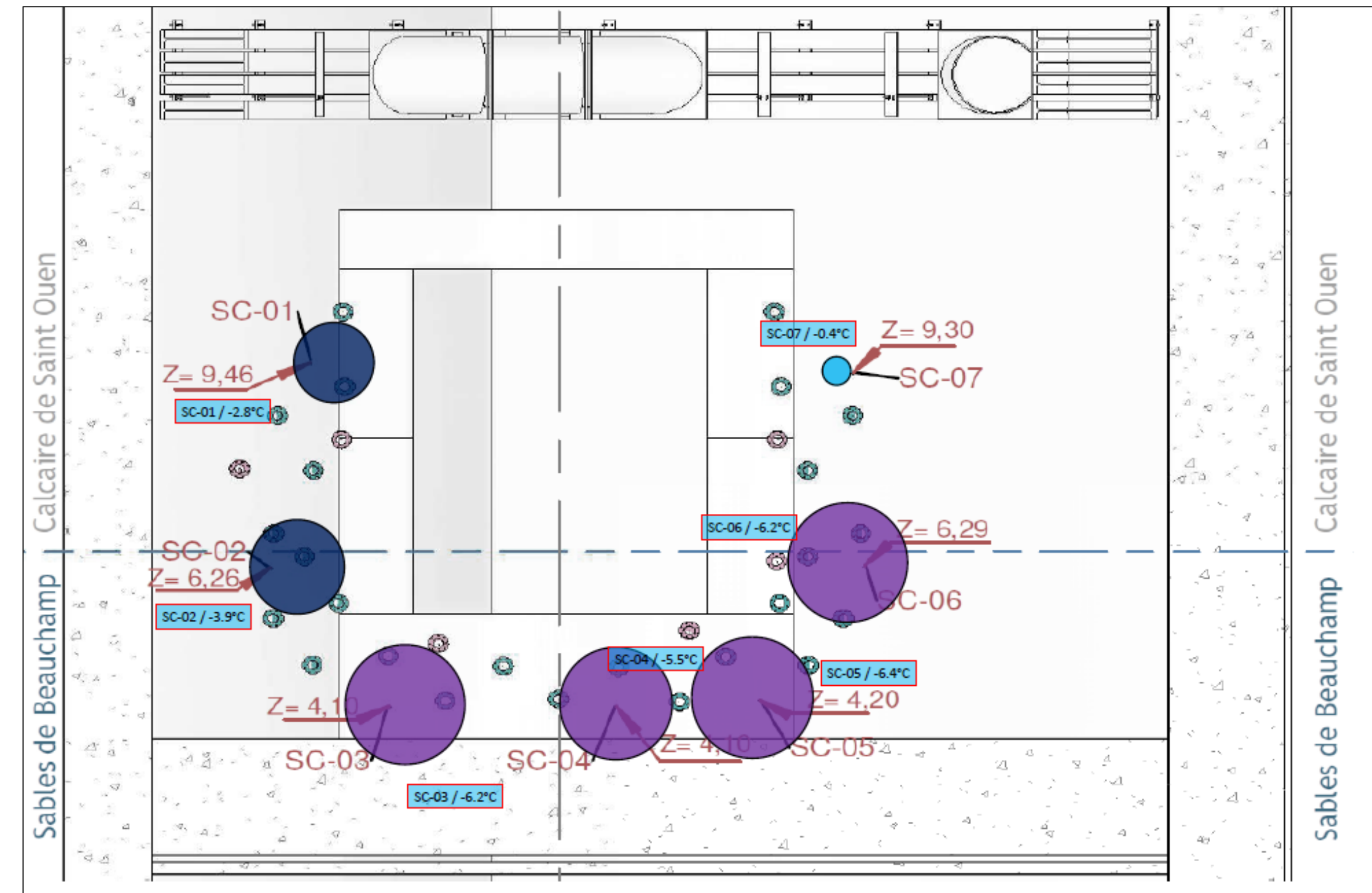
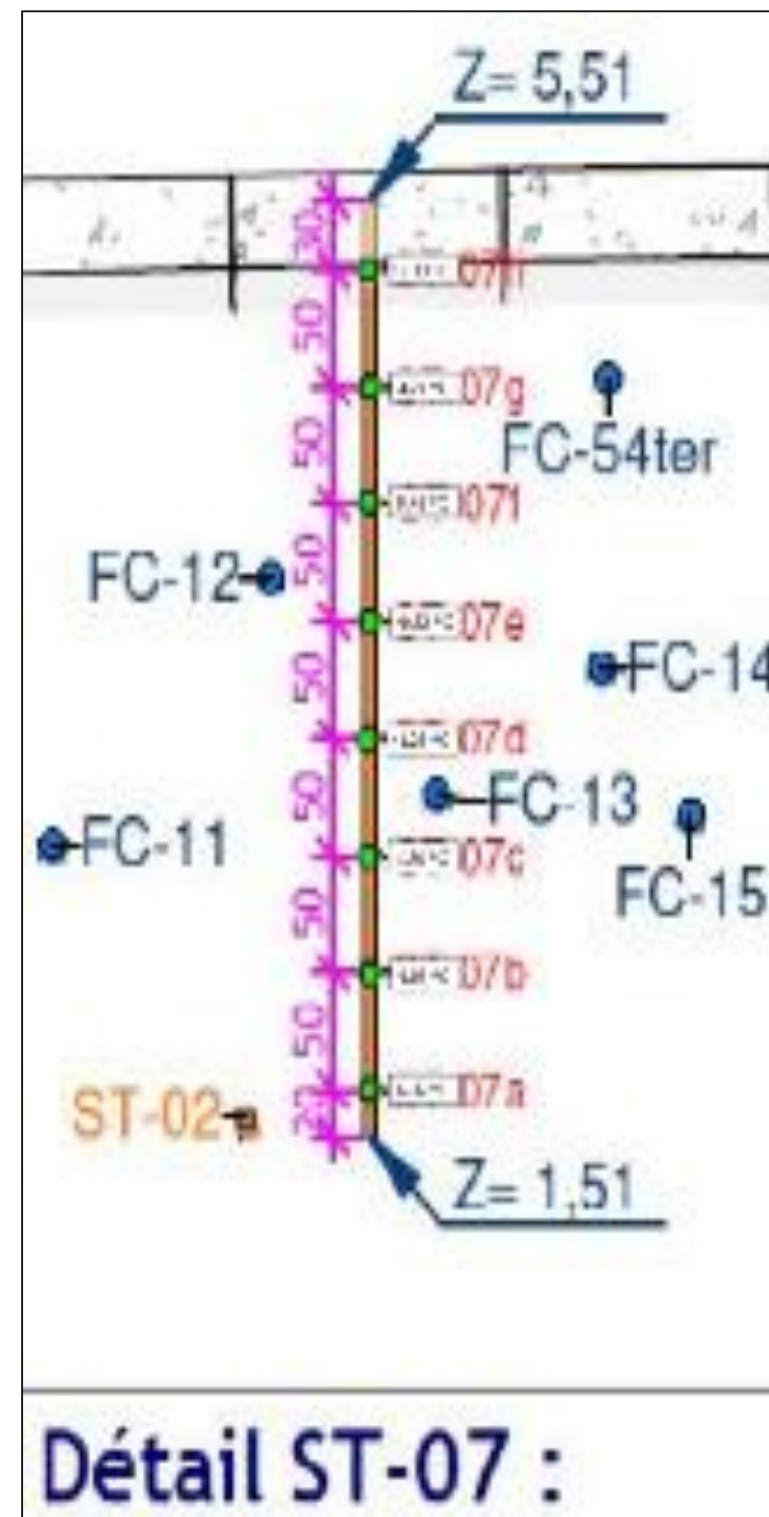
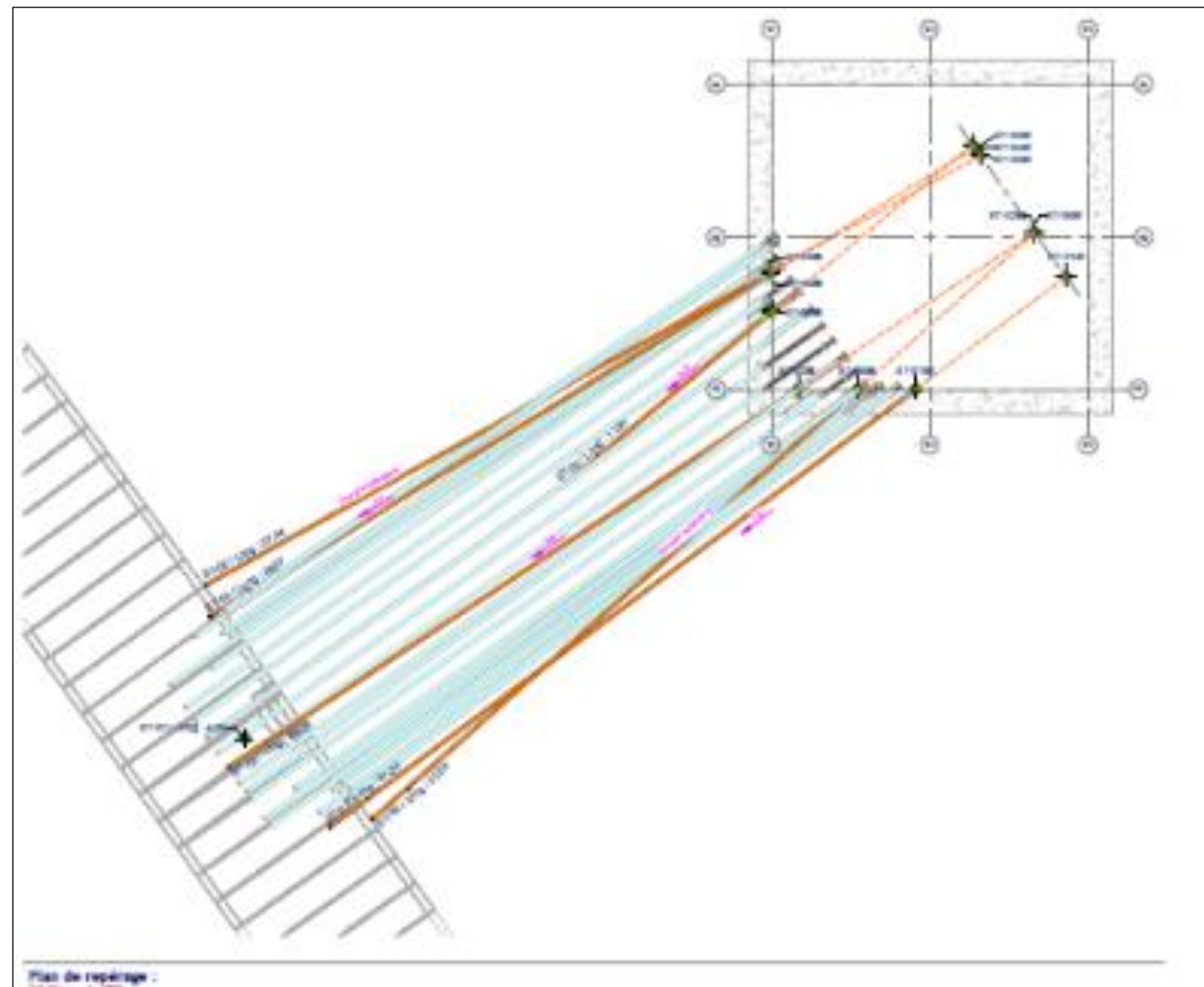
Instrumentation circuit de distribution (Max Boegl + Soleperts)



Les contrôles ...

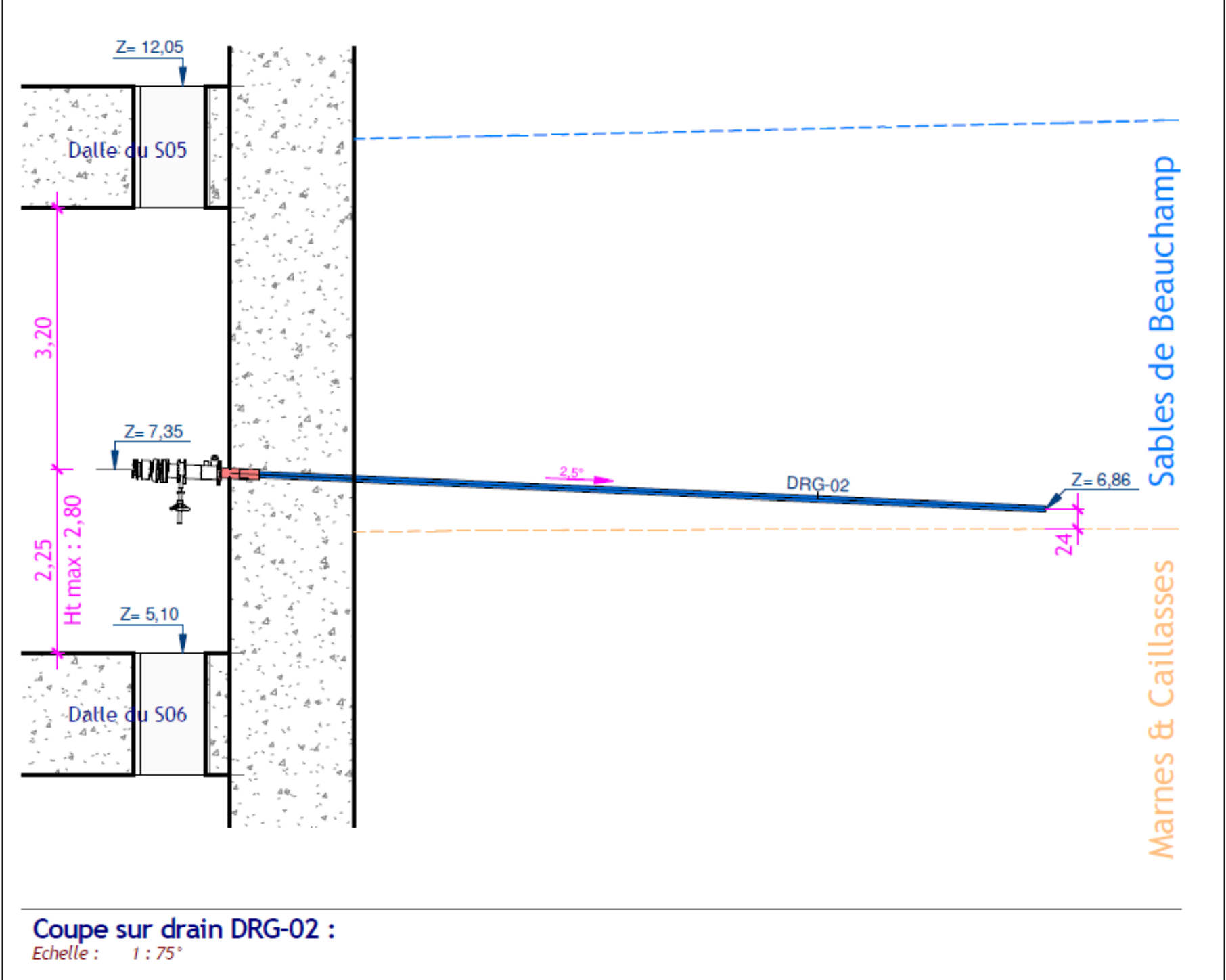
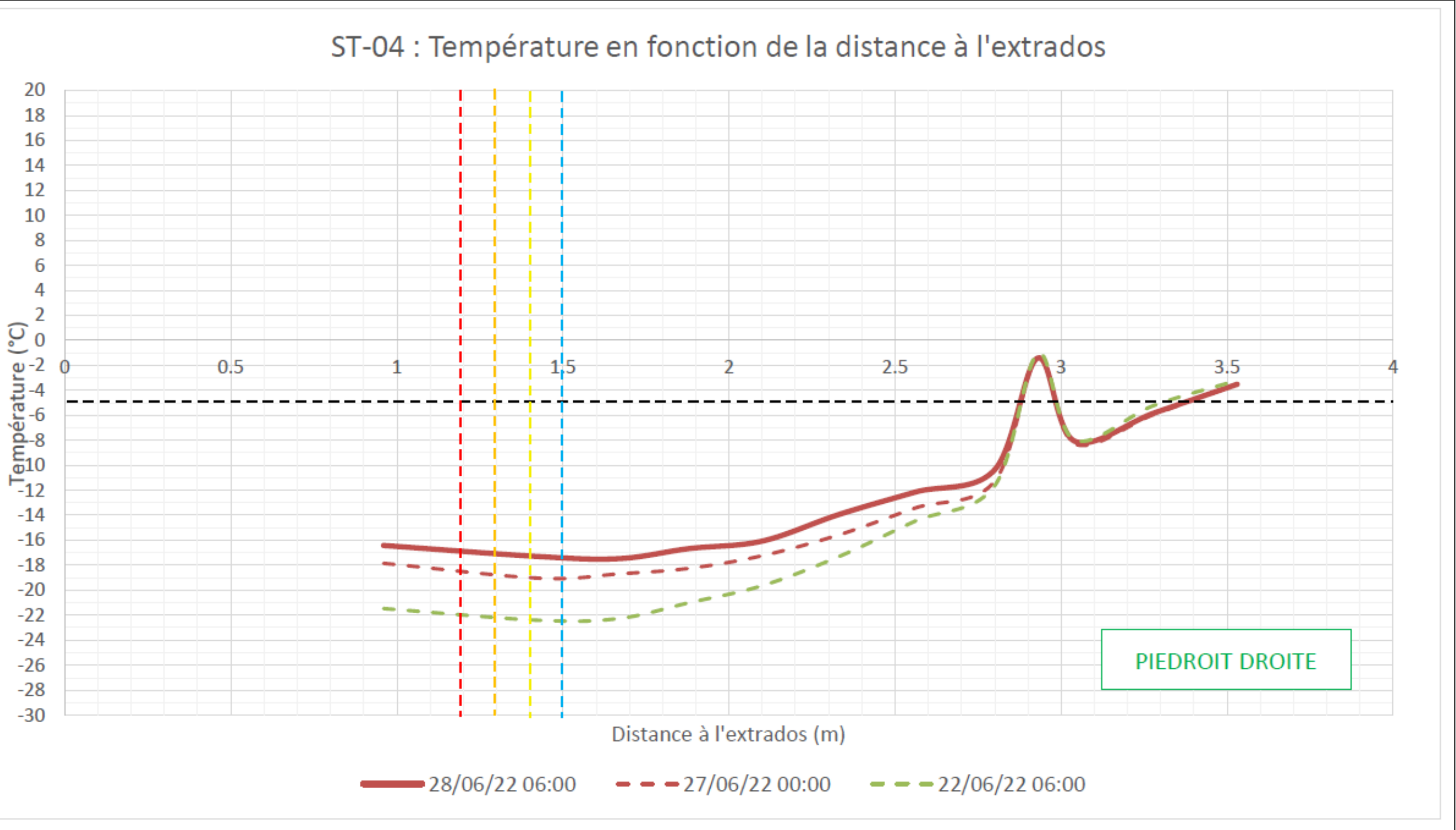
Contrôle dans le terrain (as built des forages de contrôle et positionnement des différents capteurs)

- Développement de la glace
- Effet sur la pression / le niveau de nappe



Les contrôles ...

Contrôle dans le terrain

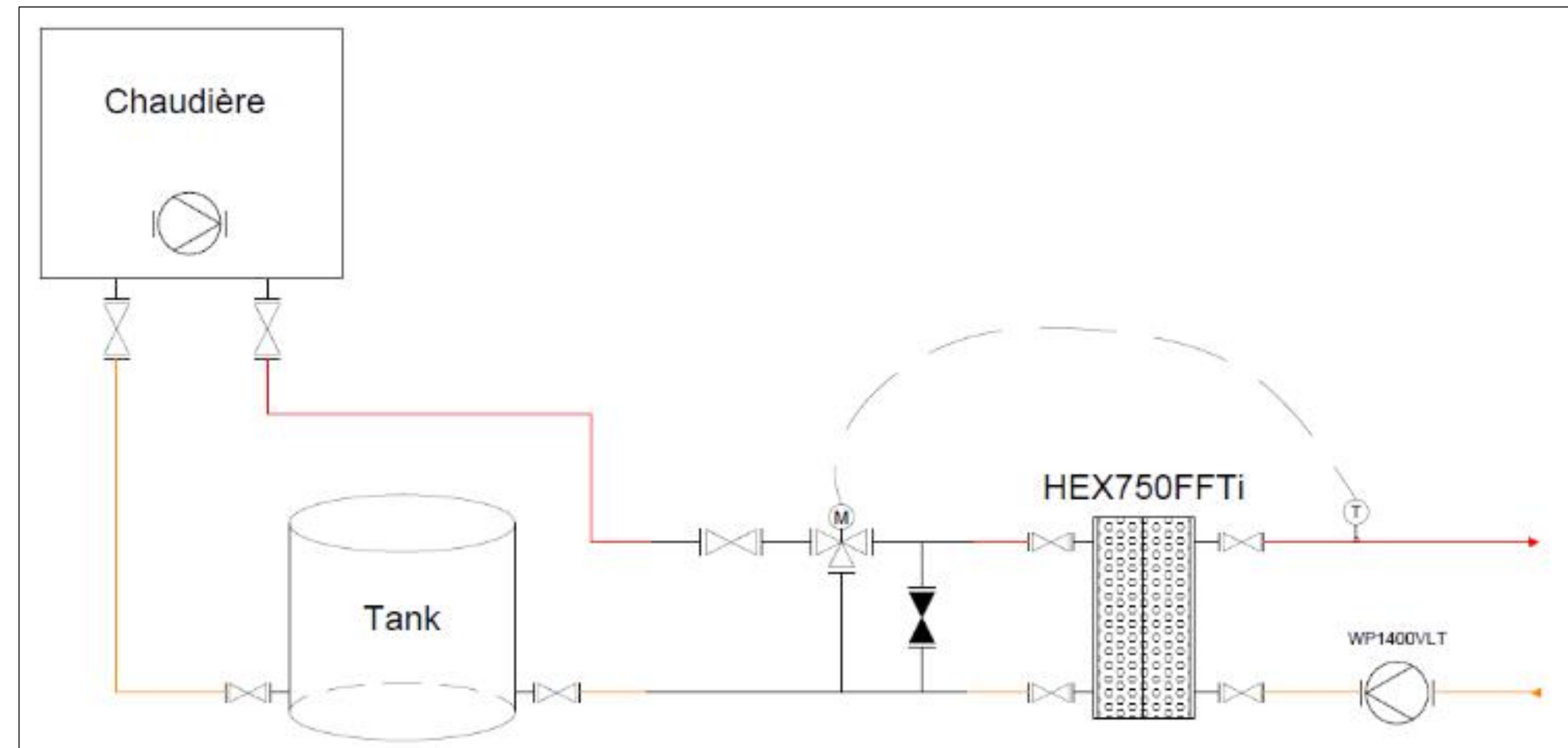


La décongélation ...

La décongélation peut être passive ou active :

- Décongélation passive : la glace fond grâce aux apports de chaleur du terrain (circulation d'eau, ...) ou d'autres sources (galeries, réseaux, ...)
- Décongélation active : Les congélateurs sont utilisés pour faire circuler un fluide caloporteur (eau, saumure, ...) à haute température (30 à 80°C) et accélérer ainsi la fonte de la glace.

Durant cette phase, il peut être nécessaire de suivre les tassements et dans certains cas (ouvrages sensibles) de mettre en œuvre si besoin des traitements permettant de compenser ces tassements.



Thank You

Questions ?