

REX sur la congélation des sols des chantiers T2A & T3A de la ligne 15 Sud du GPE



Dominique REGALLET – Bouygues TP - Directeur Technique groupement Horizon



Basile LECONTE – Soletanche Bachy – Responsable Technique France



REX T2A - VDM

Station du Vert de Maisons



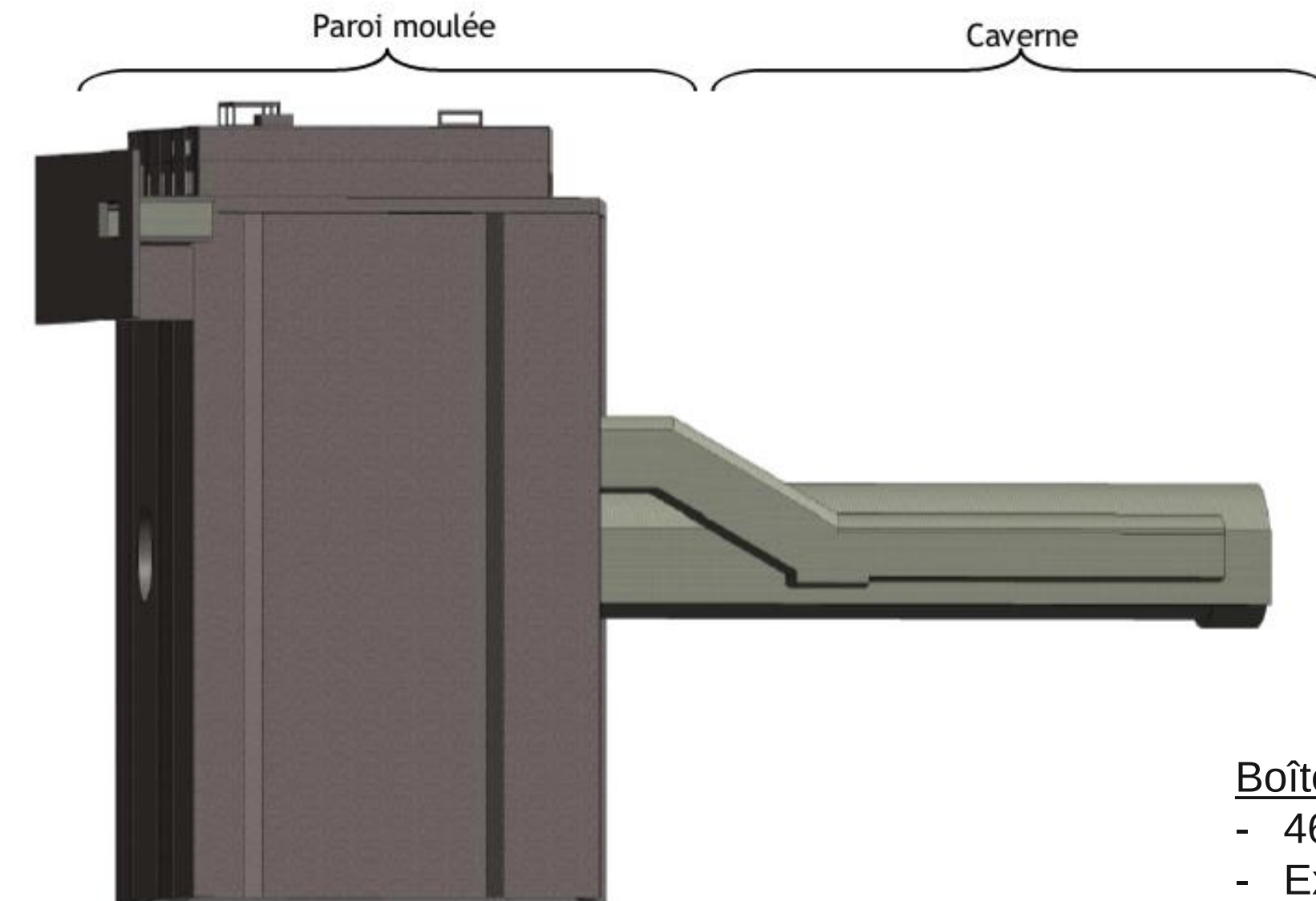
REX sur la congélation des sols des chantiers T2A
et T3A de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express

Présentation de l'ouvrage et de la congélation

Vue en plan générale

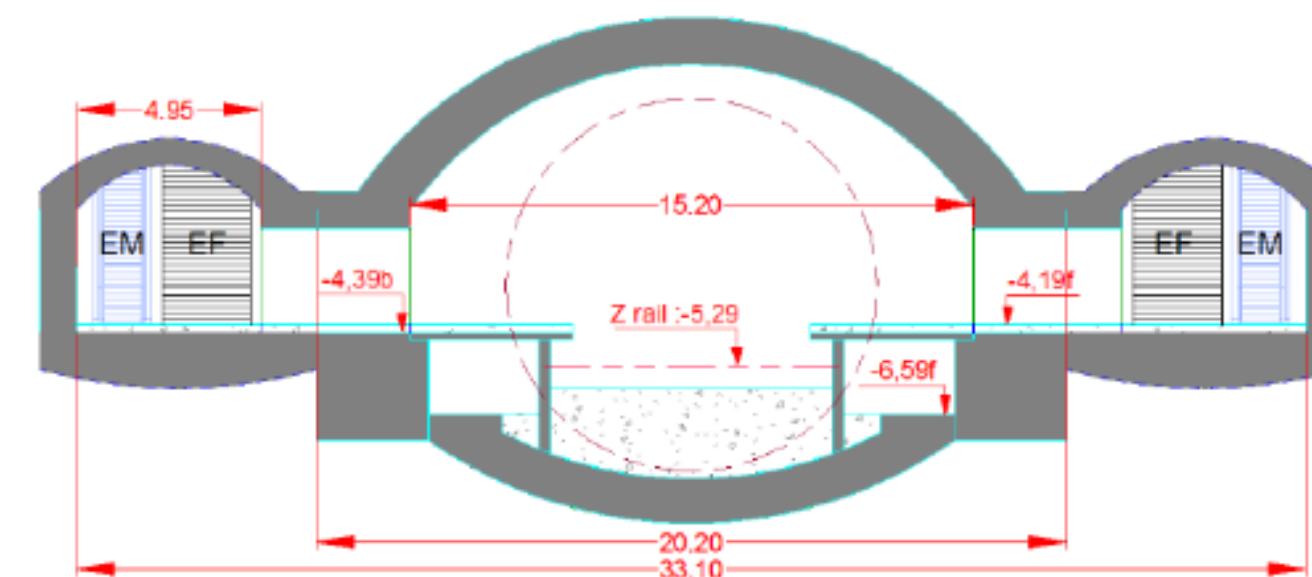


Présentation de l'ouvrage et de la congélation



- Boîte gare :
- 46 x 48m
 - Excavation à 42m
 - 10 niveaux de dalle

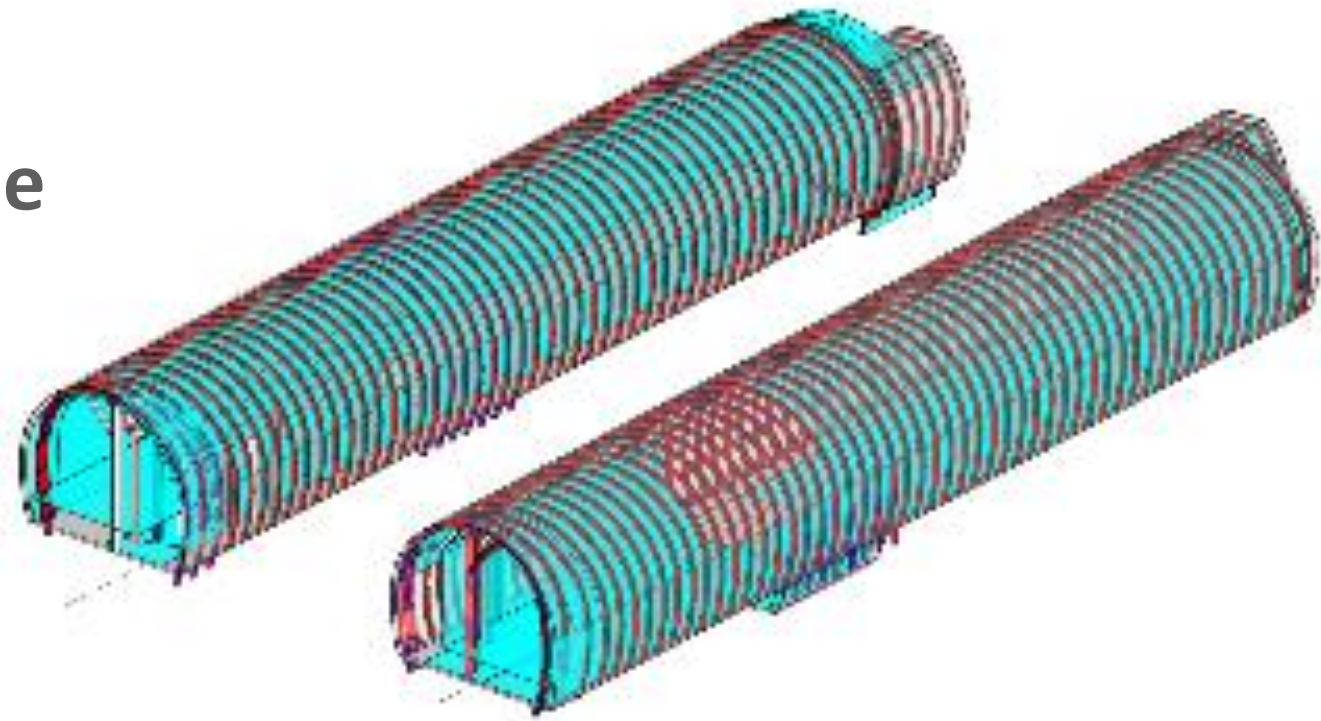
Caverne – coupe transversale



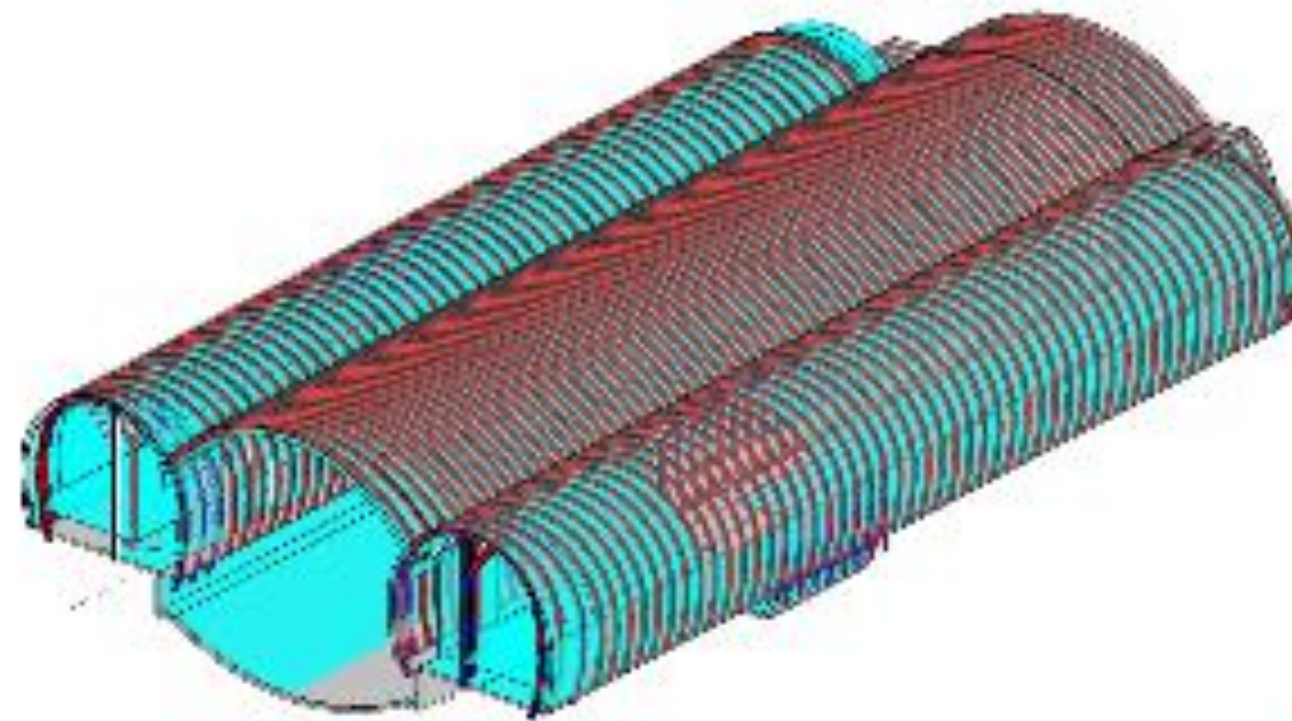
- Caverne :
- 68m de long
 - 33m de largeur
 - 13m de haut

Présentation de l'ouvrage et de la congélation

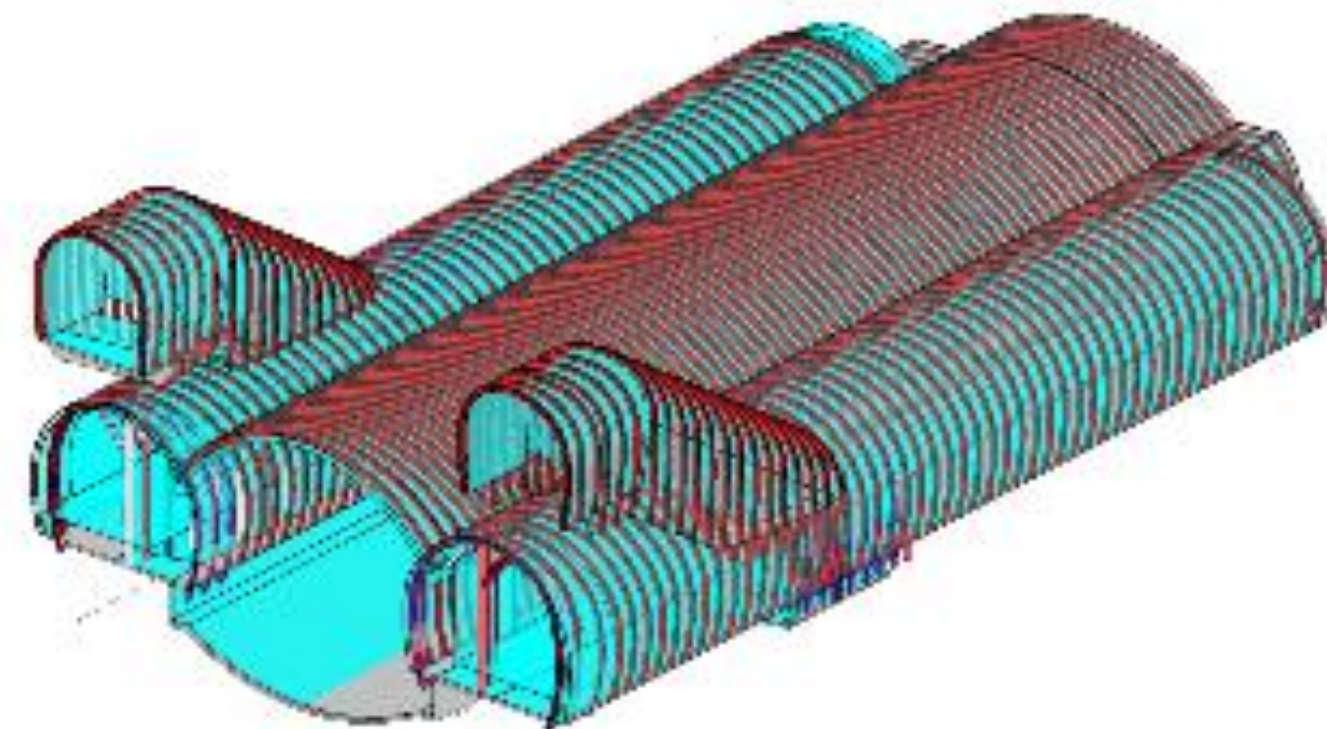
0. Passage du TBM
après excavation de
la boîte gare



1. Couloirs horizontaux latéraux
+ culées caverne



2. Galerie principale
= réalésage du tunnel



3. Couloirs
mezzanine inclinés

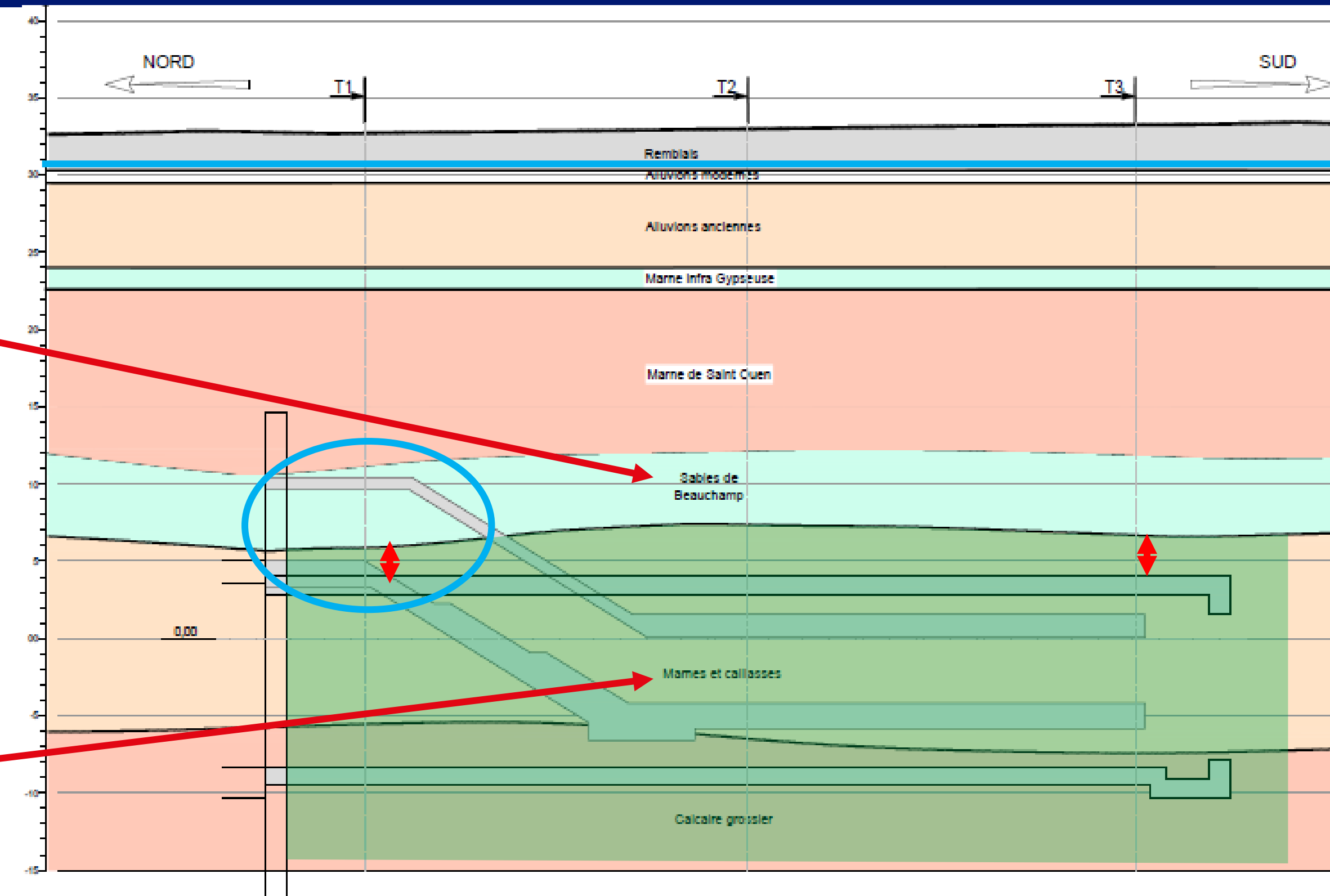
Phasage de réalisation
de la caverne

Présentation de l'ouvrage et de la congélation

Contexte géologique

Risque de débouillage des SB

Risque de fortes venues d'eau



Remblais

Nappe

Alluvions Anciennes (Sables et Gravier)

Marno-calcaire de Saint-Ouen

Sables de Beauchamp (Sable silteux)

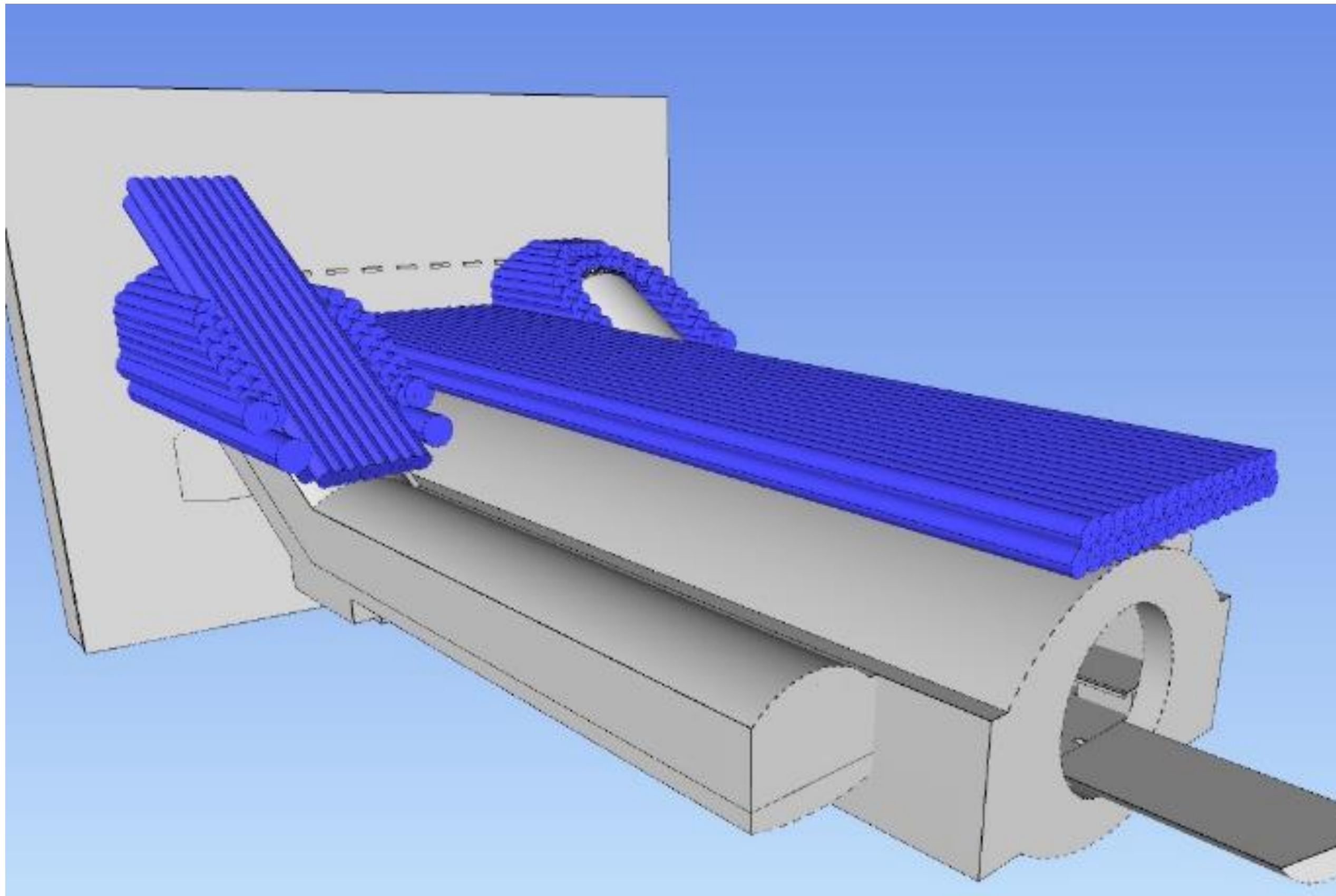
Marnes et Caillasse

Calcaire Grossier (massif) jusqu'à 64m env.

- ♦ Couverture de MC réduite à moins de 2m par endroits => **Risque de débouillage des SB**
- Injection des MC et du CG pour réduction de perméabilité à 10-6m/s => **Réduction du débit d'exhaure**
- Galerie mezzanine à excaver dans les SB => **Risque de débouillage**

Présentation de l'ouvrage et de la congélation

Traitement du risque de débouillage des SB par congélation



Galleries mezzanine

- 2 x 1300m de forage ;
- 2 x 85 forage de 7 à 30m de longueur ;
- 2 auréoles de congélateurs ;
- 2 x 8 forages de contrôle de température => plus de 150 capteurs de température dans le terrain ;

Objectif (disposition constructive):

- Congélation des SB avec ancrage dans les MC injectées ;
- Etanchement et amélioration mécanique des SB ;

Dalle congelée

- 2500m de forage ;
- 36 congélateurs de 75 à 80m répartis sur 2 niveaux ;
- 20 forages de contrôle de température => plus de 200 capteurs de température dans le terrain ;

Objectifs (gestion d'un risque) :

- Congélation de l'interface SB/MC ;
- Etanchement seul (amélioration mécanique non prise en compte dans les calculs ;

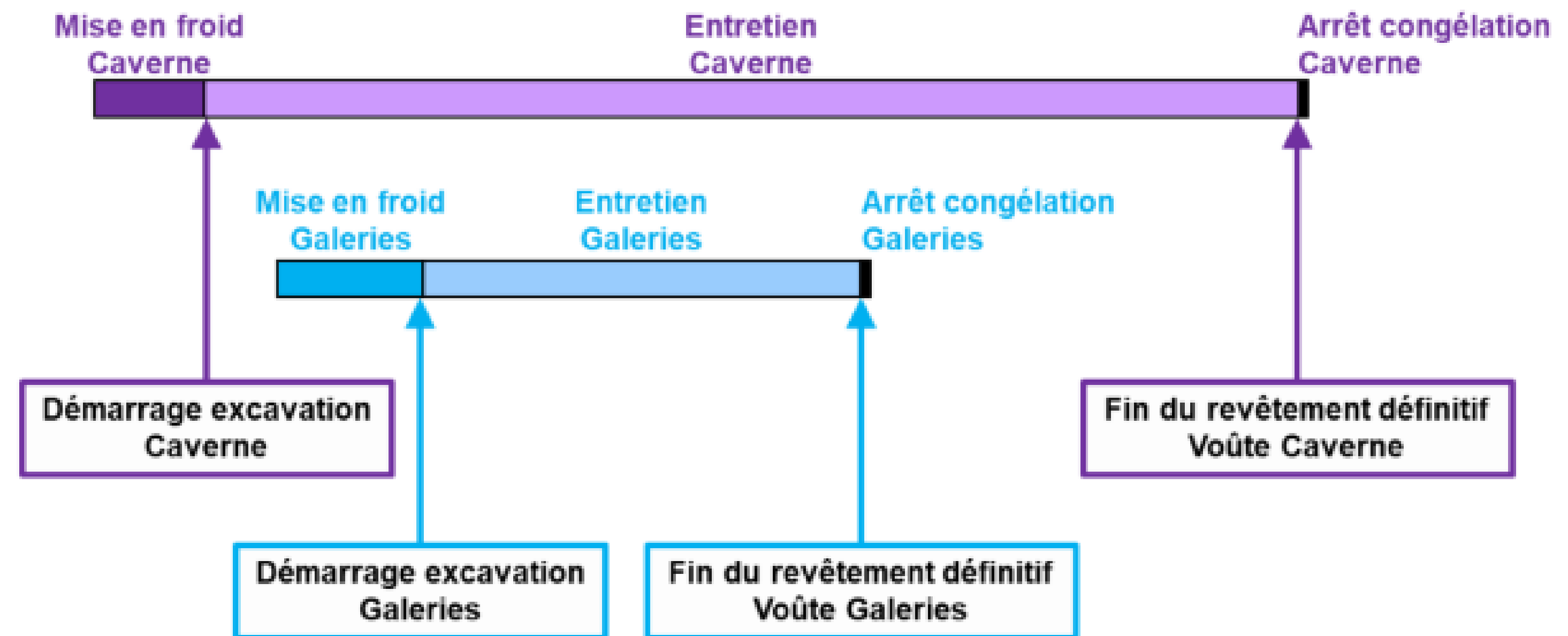
Congélateurs de la dalle



REX sur la congélation des sols des chantiers T2A
et T3A de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express

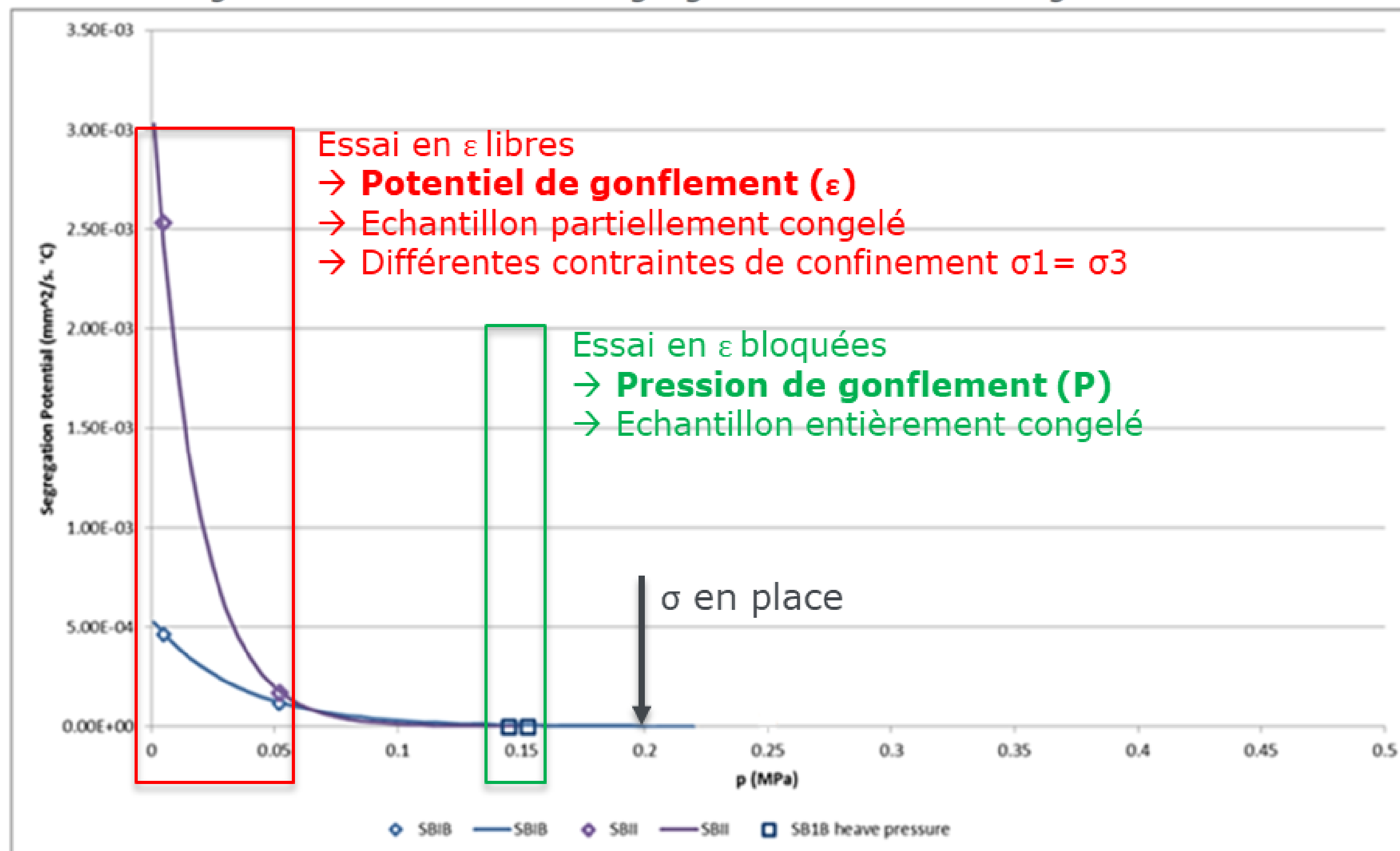
Présentation de l'ouvrage et de la congélation

Phasage global de la congélation initialement prévu



Mise en froid et gestion des soulèvements associés

Figure 20 : Potentiel de Ségrégation et Pression de gonflement.



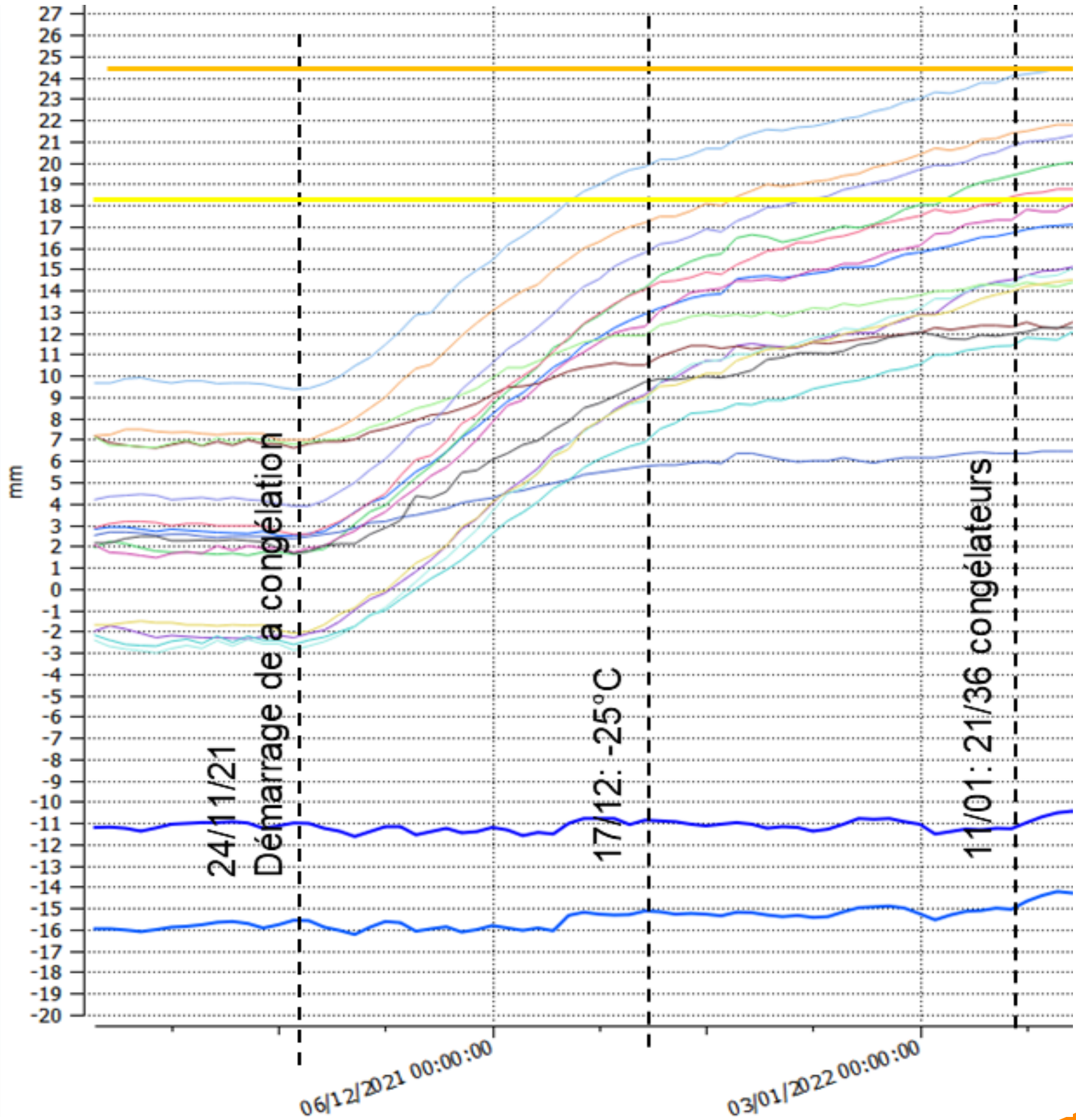
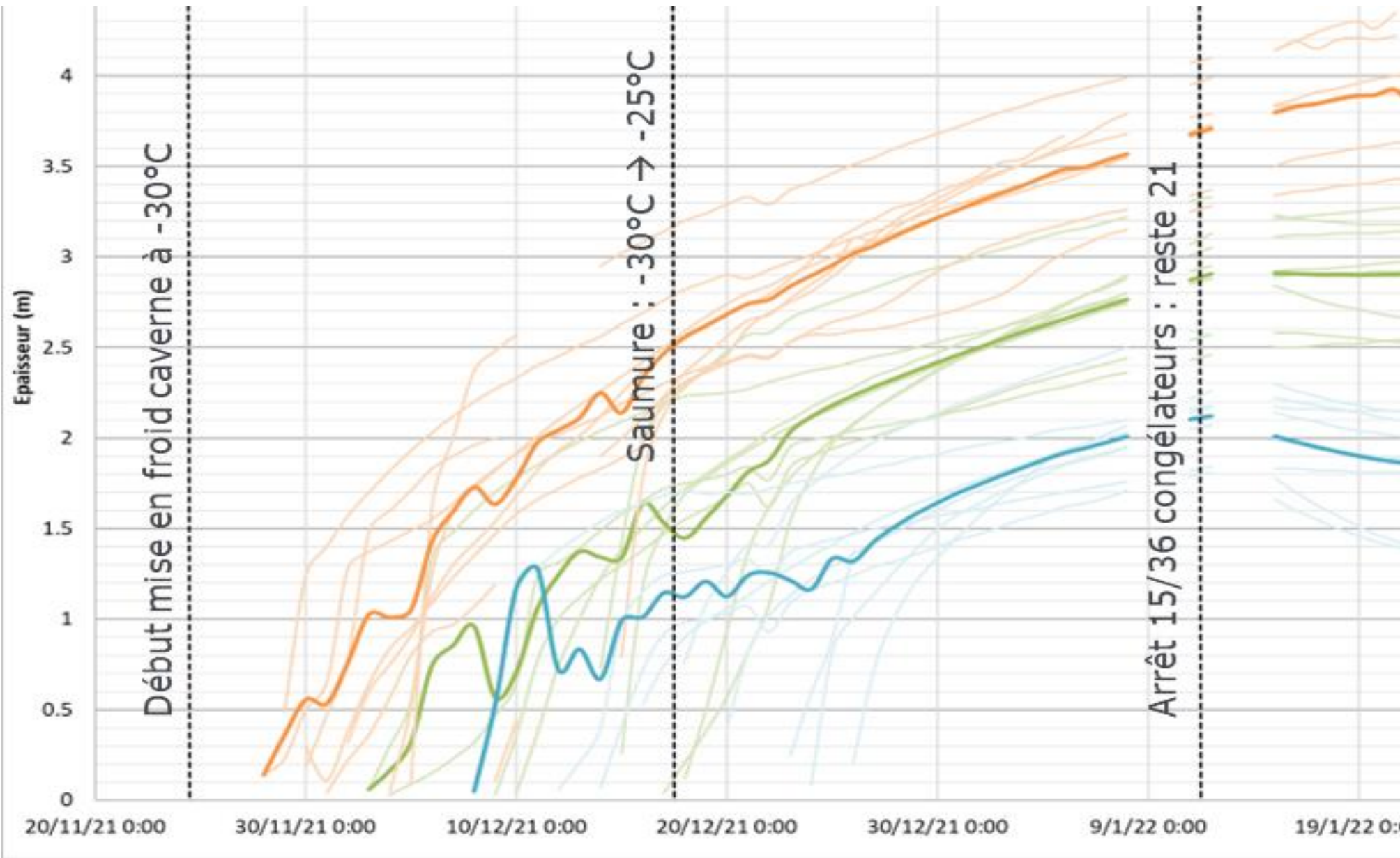
Soulèvements attendus (calculs Plaxis 2D)

- Taux d'expansion de la glace = **1%**
- Soulèvement relatif max lié à la mise en froid = **2mm**
- **Potentiel de ségrégation nul dans les conditions de chantier**

Mise en froid et gestion des soulèvements associés

Date	Constats	Actions
24/11/21		Démarrage MEF (Mise En Froid) de la dalle à -30°C
17/12/21	Dépassement seuil de vigilance soulèvement bâti	Passage de la saumure de -30 à -25°C
11/01/22	Atteinte des critères de pilotage de congélation => entretien de la dalle congelée	Neutralisation de 15 congélateurs / 36 : reste 21

Evolution des épaisseurs de glace aux différentes isothermes

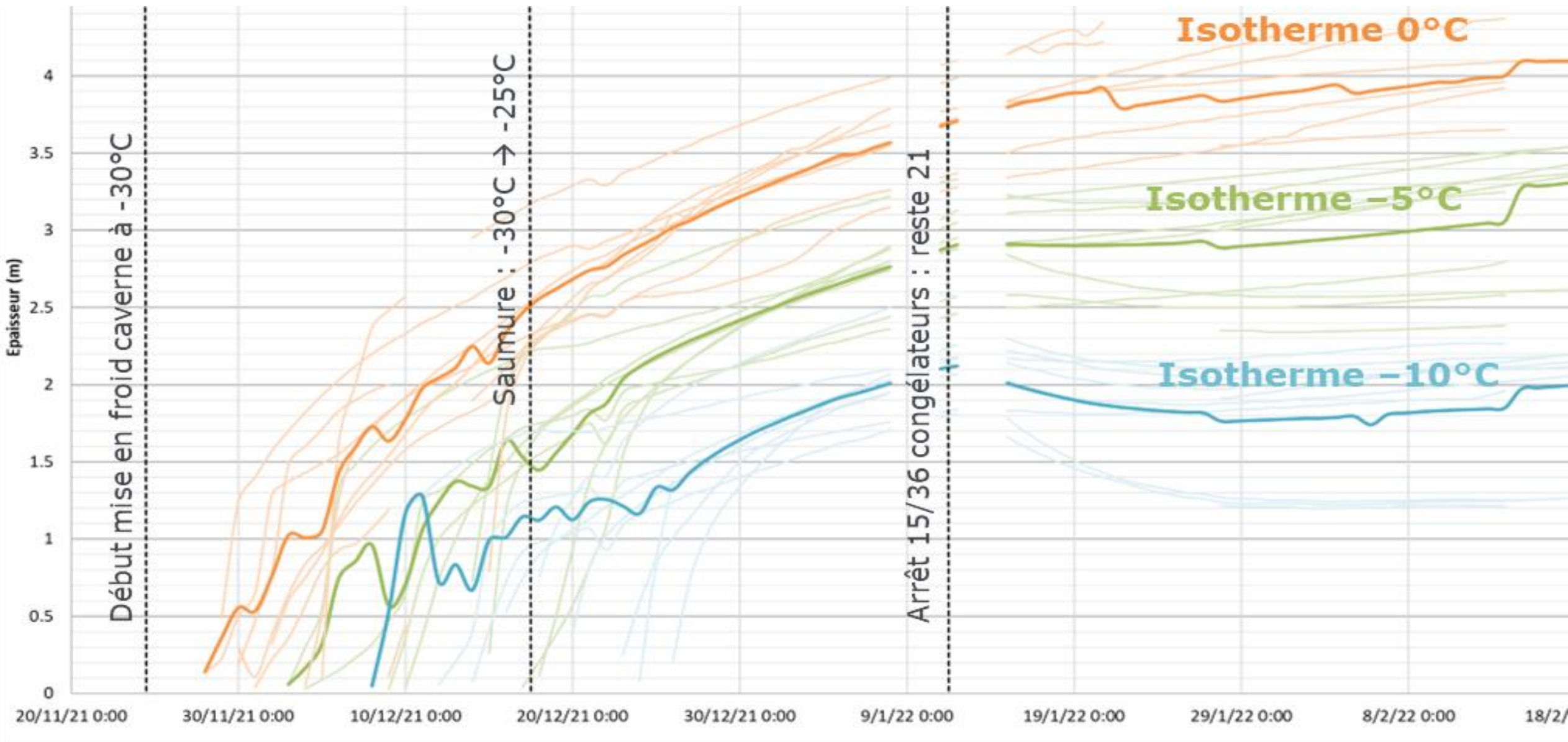


Evolution des soulèvements en surface

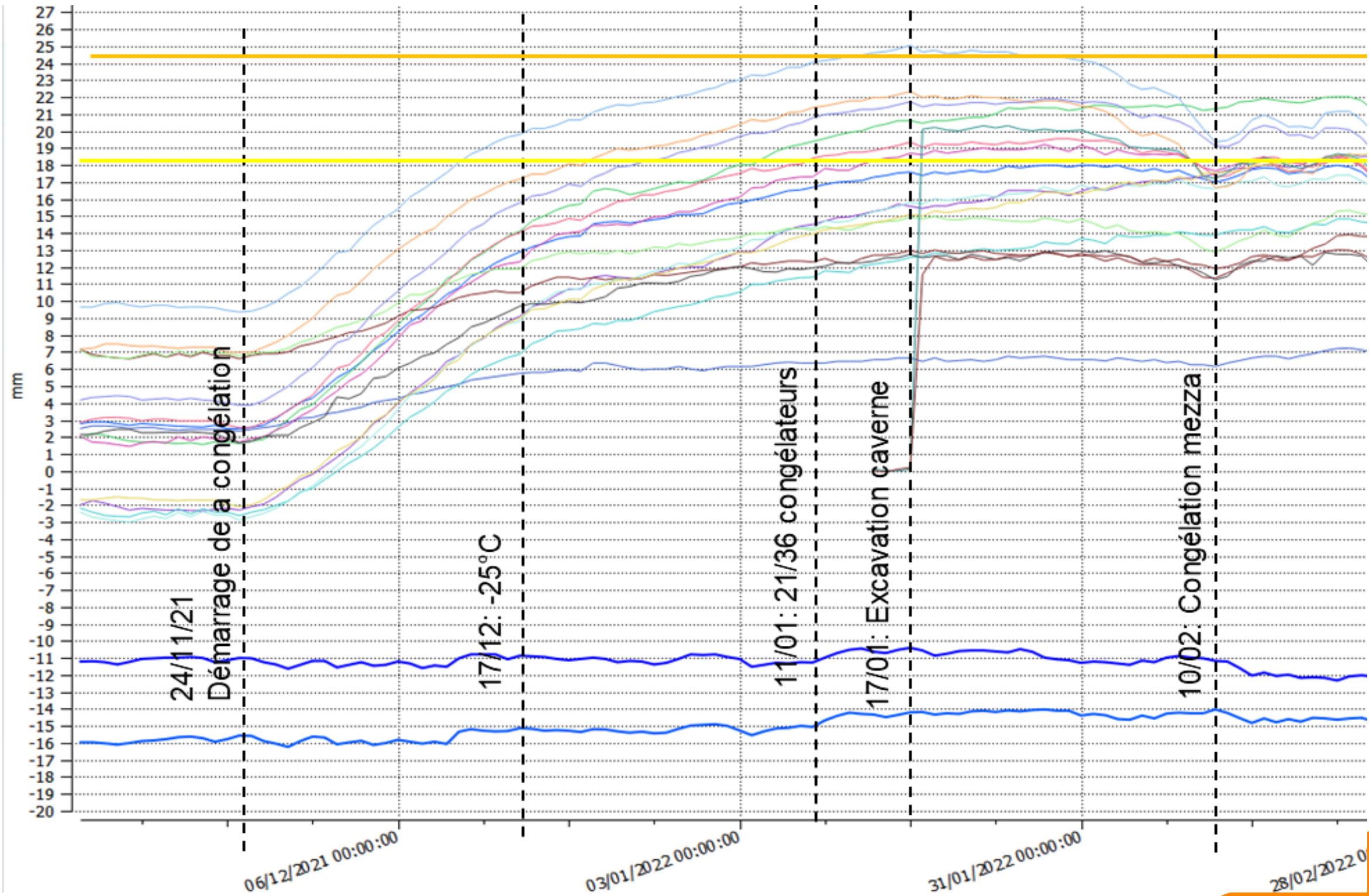
Mise en froid et gestion des soulèvements associés

Date	Constats	Actions
17/01/22		Démarrage du réalésage de la caverne
10/02/22	Hausse du seuil contractuel +Tassements liés à l'excavation observés.	Démarrage de la MEF des galeries mezzanine à -25°C

Evolution des épaisseurs de glace aux différentes isothermes

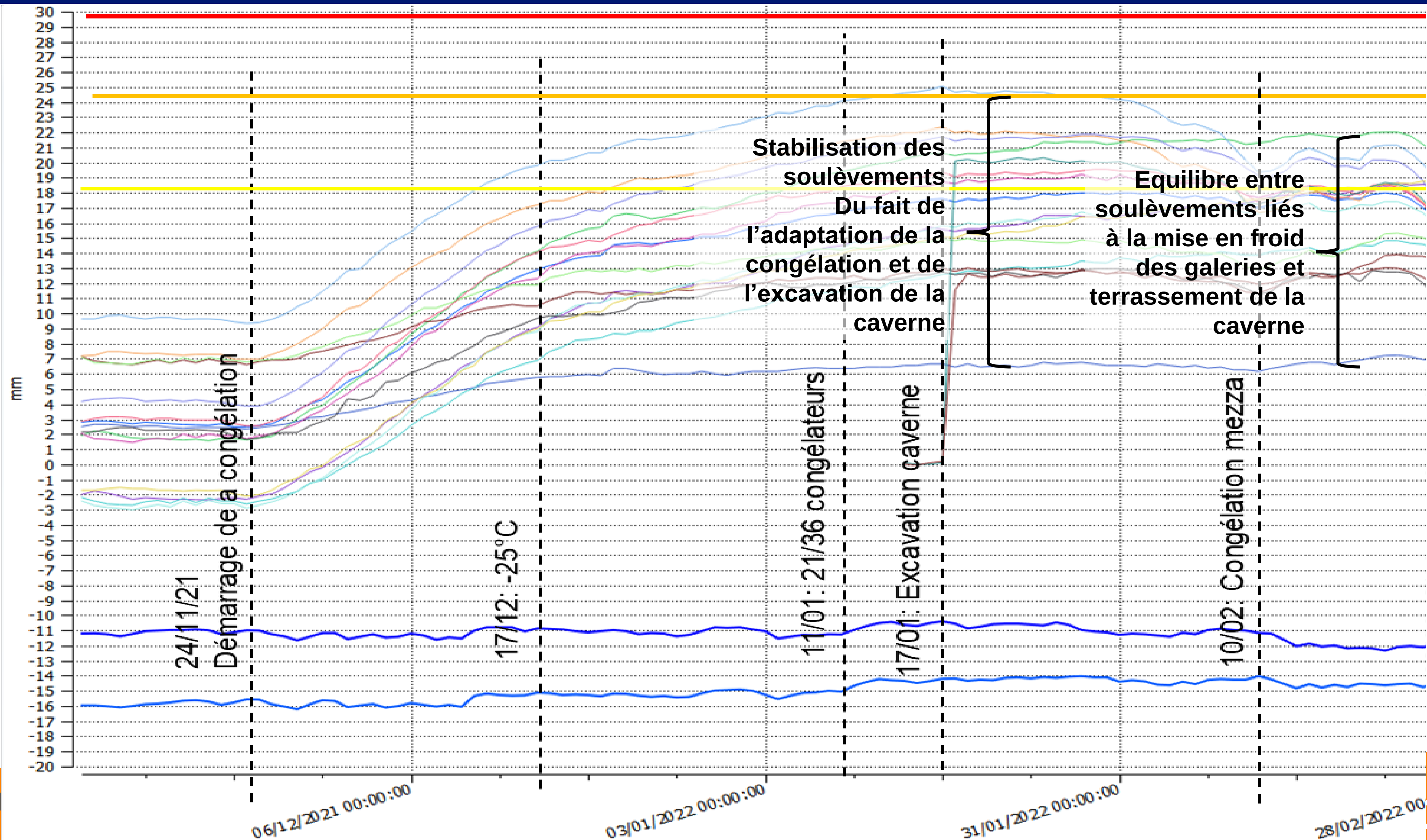


Evolution des soulèvements en surface



Mise en froid et gestion des soulèvements associés

Etat des
soulèvements
après les
injections des
MC et CG



Mise en froid et gestion des soulèvements associés

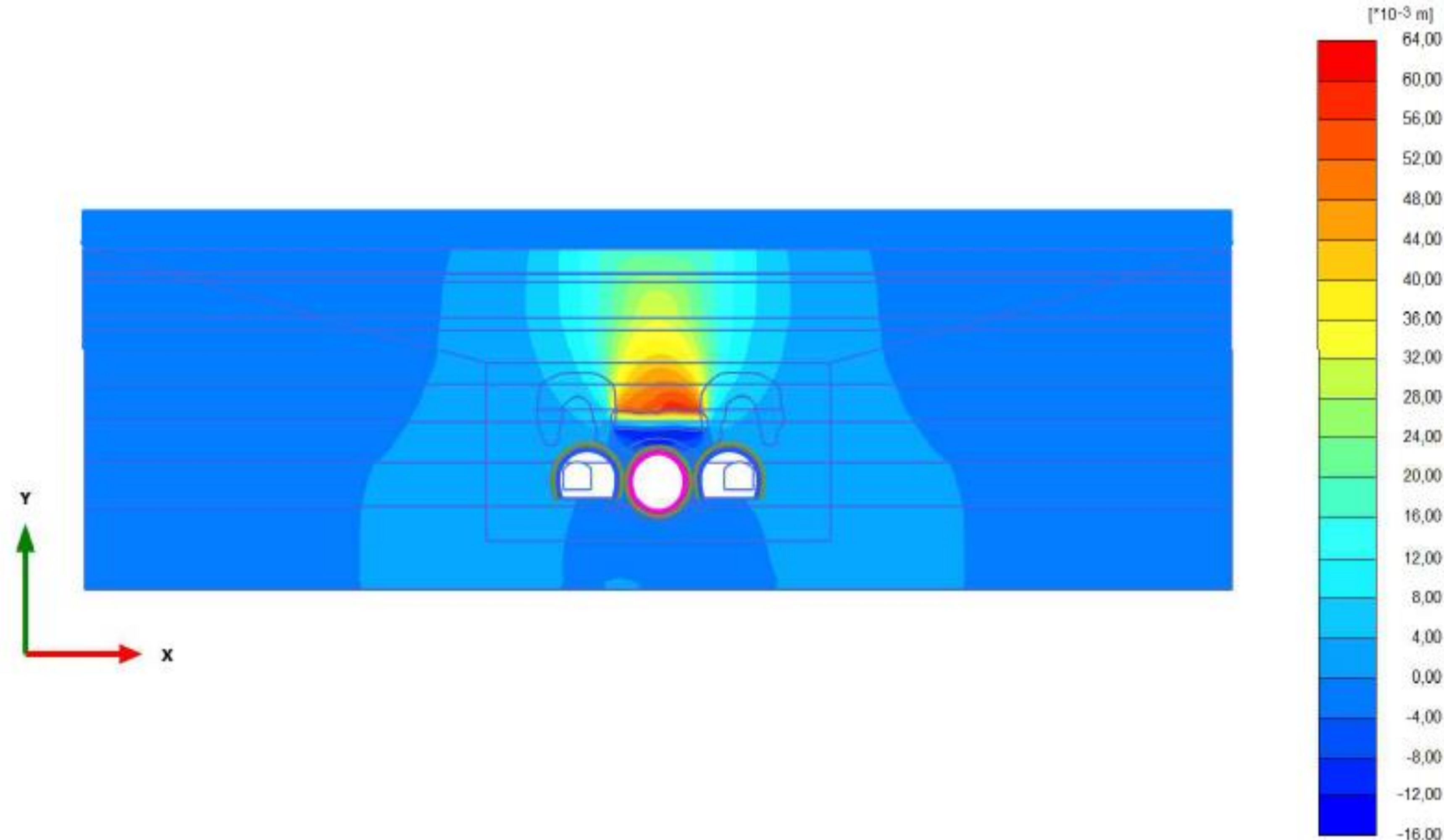
Bilan des soulèvements AVANT et APRES mise en froid de la dalle congelée

Attendu selon essais labo et calculs

- Taux d'expansion de la glace = **<1%**
- Soulèvement différentiel = **négligeable**
- Soulèvement relatif max lié à la mise en froid = **2mm**

Mesuré

- Soulèvement différentiel => **OK**
- Soulèvement relatif max lié à la mise en froid = **19mm**
- Taux d'expansion réel évalué par rétro-analyse (calcul Plaxis) = **2,7%**



Mise en froid et gestion des soulèvements associés

NOTRE COMPREHENSION DES SOULEVEMENTS

- Soulèvements plus importants qu'attendus => Taux de gonflement plus importante et/ou potentiel de ségrégation non nul ?
- Stabilisation des soulèvements avec stabilisation de l'isotherme à 0°C => A priori potentiel de ségrégation nul

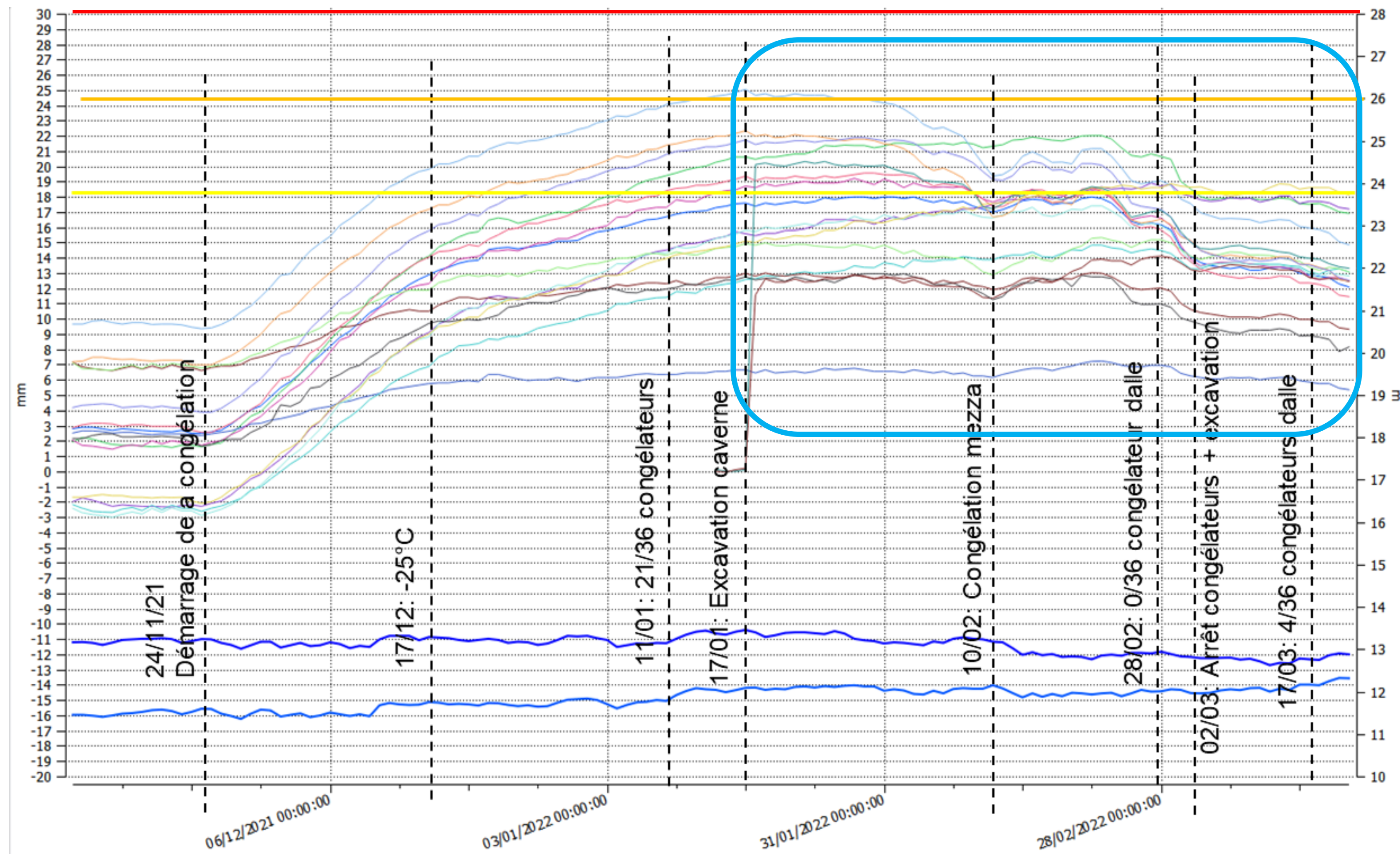
=> Les soulèvements sont liés à un facteur d'expansion de la glace (lié au changement de phase) plus important qu'attendu

LES REFLEXIONS POUR DE FUTURS CHANTIERS

- Représentativité des essais de « frost heave » et « frost pressure » menés en laboratoires ?
- Détermination du taux de gonflement réel par rétro-analyse à confronter aux paramètres de sols pris en compte dans les calculs (raideur, plastification, M_{ref} , ...) ?

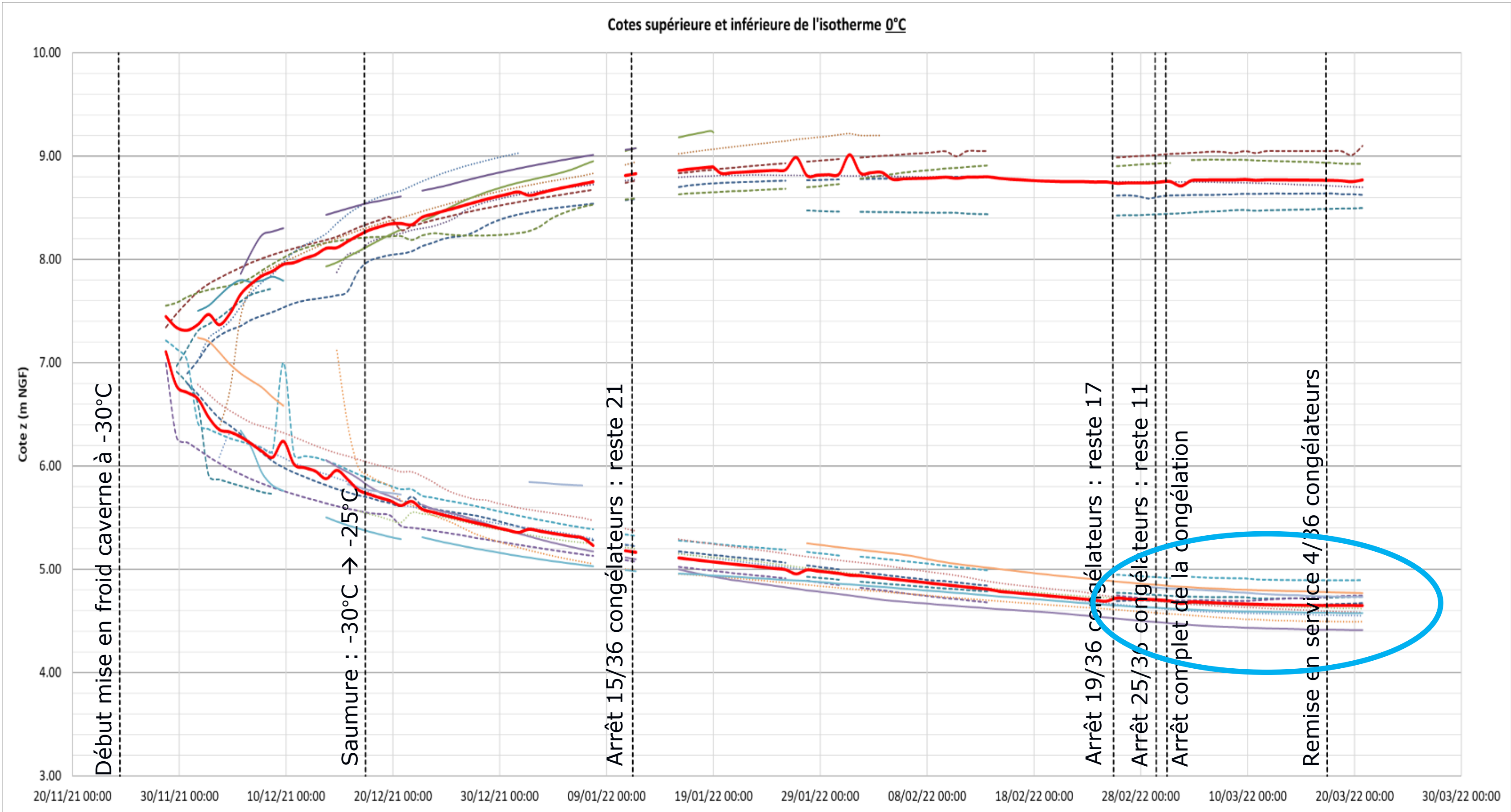
Conséquence de la congélation sur le soutènement provisoire de la caverne

Répercussions en surface



Conséquence de la congélation sur le soutènement provisoire de la caverne

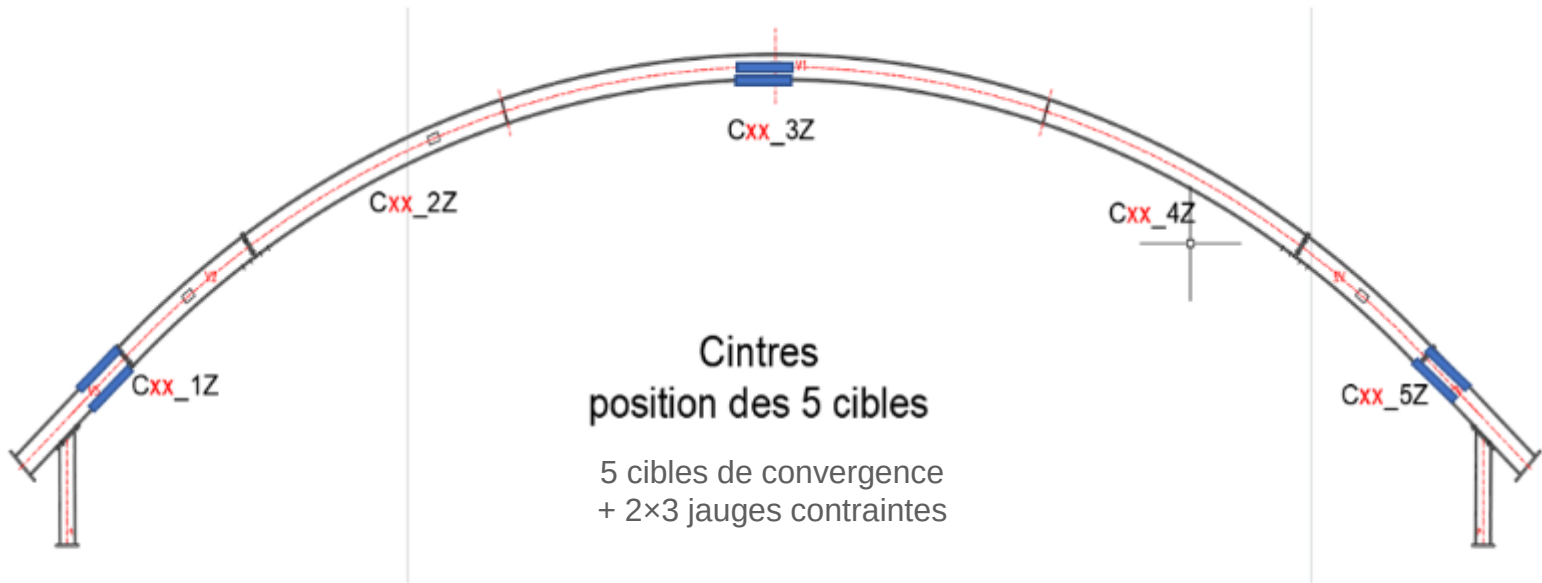
Evolution de l'épaisseur de glace



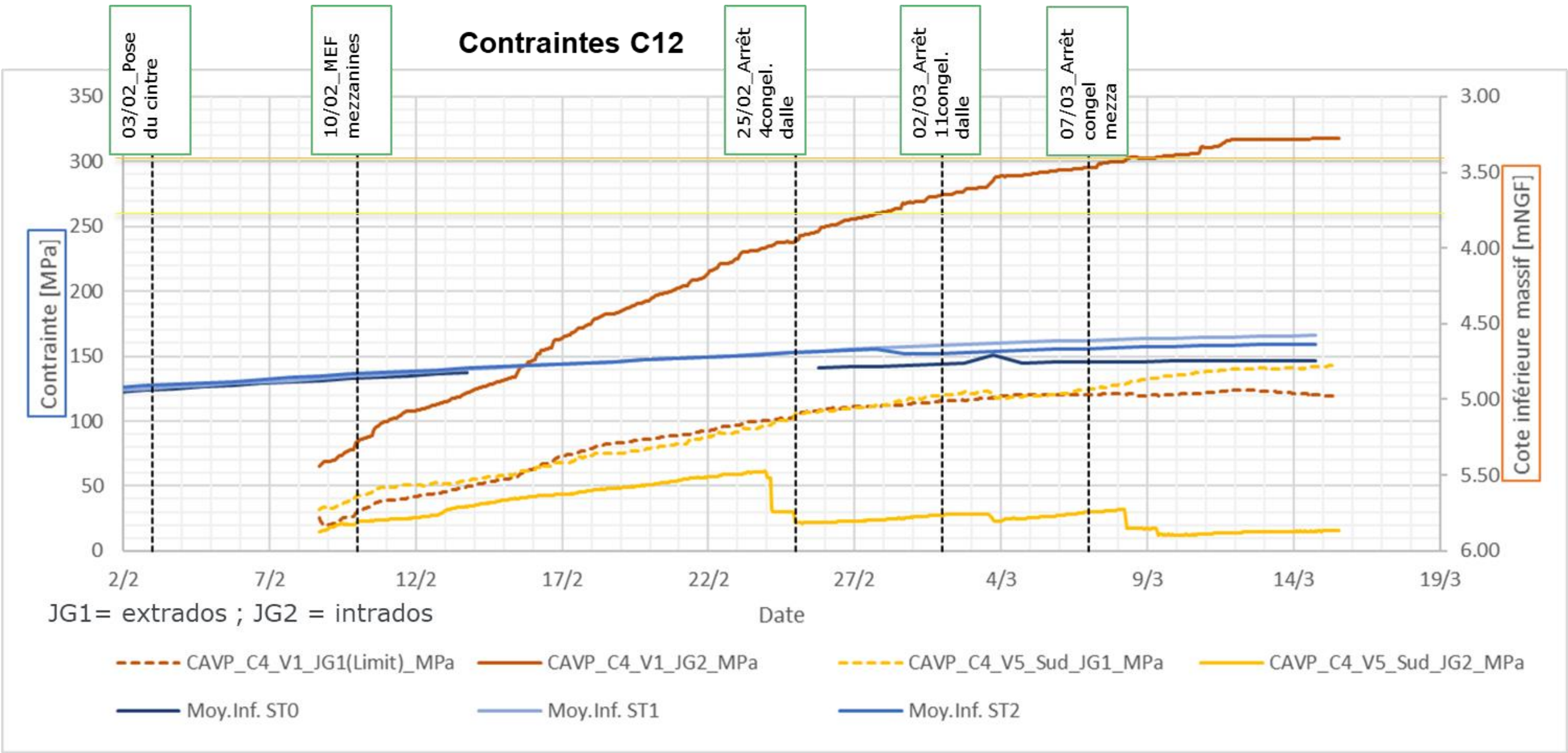
Malgré l'arrêt de la congélation, l'isotherme 0°C progresse toujours

Conséquence de la congélation sur le soutènement provisoire de la caverne

Date	Constats	Actions
25/02/22	Tassement des cintres de la caverne = lien avec congélation dalles et mezzanines	Arrêt de 4 congélateurs dalle : reste 17
27/02/22	Atteinte du seuil de vigilance des contraintes (260 MPa) sur le cintre C4 puis C12 2 jours après	
01/03/22	But de stabiliser le développement de l'isotherme 0 de la dalle	Arrêt de 6 congélateurs dalle : reste 11
02/03/22	But d'arrêter le développement de l'isotherme 0 de la dalle	Arrêt de 11 congélateurs dalle : reste 0 + arrêt excavation
05/03/22	Augmentation de la flexion des cintres à cause de la congélation des mezzanines	Arrêt des congélateurs de piédroits des galeries mezza
07/03/22	But d'arrêter le développement de l'isotherme 0 des mezzanines	Arrêt de la totalité des congélateurs des galeries mezza



Mesures topo	Date de pose	Première mesure	Δjours/pose	Voute max [mm]	Piédroits max [mm]	Tassement Voute/pieds
C03	19/01/2022	31/01/2022	12	-45	-39	-6
C04	19/01/2022	21/01/2022	2	-62	-56	-6
C05	24/01/2022	31/01/2022	7	-53	-47	-6
C09	31/01/2022	01/02/2022	1	-60	-68	+8
C12	03/2/2022	07/02/2022	4	-51	-62	+11
C18	10/02/2022	18/02/2022	8	-31	-37	+6
C22	17/02/2022	21/02/2022	4	-	-38	-
C27	23/02/2022	25/02/2022	2	-18	-27	+9
C32	01/03/2022	04/03/2022	3	-6	-5	



Conséquence de la congélation sur le soutènement provisoire de la caverne

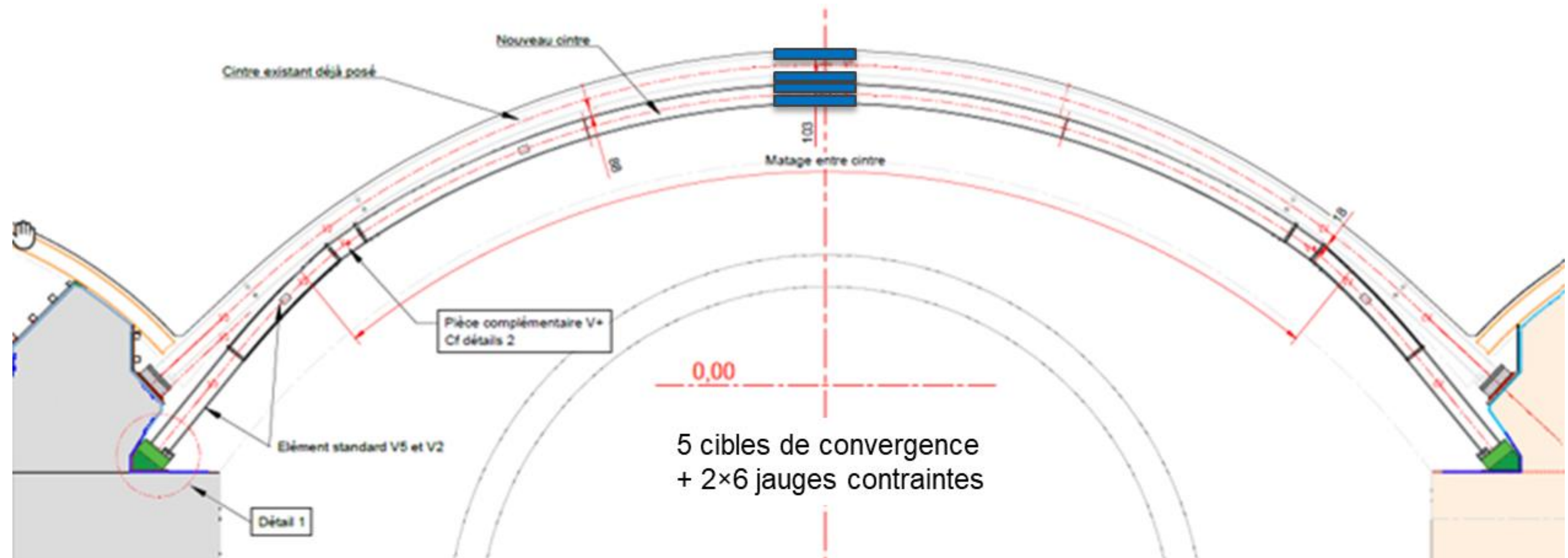
Date	Constats	Actions
08/03/22 (nuit du 7 au 8)		Pose du 1 ^{er} cintre de renfort sur le C11
13/03/22 (matin)	Stabilisation des contraintes dans les cintres Stabilisation de l'isotherme 0 de la dalle	Tous les cintres de renfort C2 à C18 posés et matés
17/03/22	Souhait de maintien de la raideur de la dalle congelée	Remise en froid de 4 congélateurs sur la dalle



Renforcement des cintres sur les 18 premiers mètres par doublement

Conséquence de la congélation sur le soutènement provisoire de la caverne

Principe de doublement des cintres



Conséquence de la congélation sur le soutènement provisoire de la caverne

NOTRE COMPREHENSION

- Les développements simultanés des massifs de glace de la dalle et des galeries ont générés des efforts sur le soutènement provisoire de la caverne.
- Ce phénomène a été rendu possible du fait de la « désolidarisation » entre excavation et massif congelé.
- La stabilisation du « système » n'a pu se faire qu'à la faveur d'une maîtrise précise de la congélation dans le but de stabiliser l'isotherme à 0°C.

LES REFLEXIONS

- Gestion de la « non-simultanéité » entre atteinte des critères de pilotage (définis ici à -5°C ou à -10°C) et stabilisation de l'isotherme 0°C => inertie de la congélation.
- Risque d'incompatibilité entre stabilité de l'isotherme 0°C (épaisseur limitée pour rester dans les seuils de soulèvement par exemple) et atteinte des critères de pilotage (critères à -5°C ou -10°C).

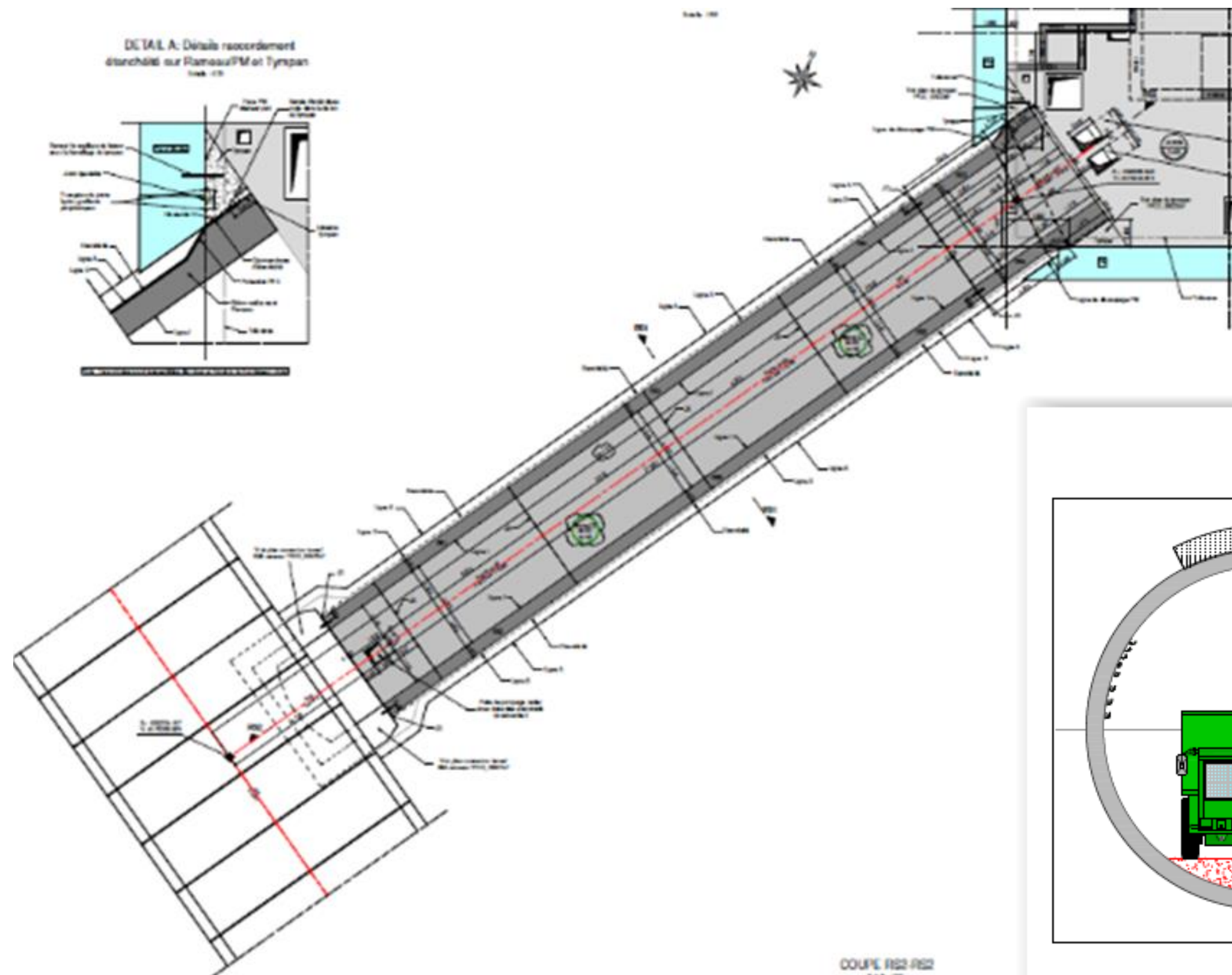
REX T2A – OA 1404

Puits et rameau de secours

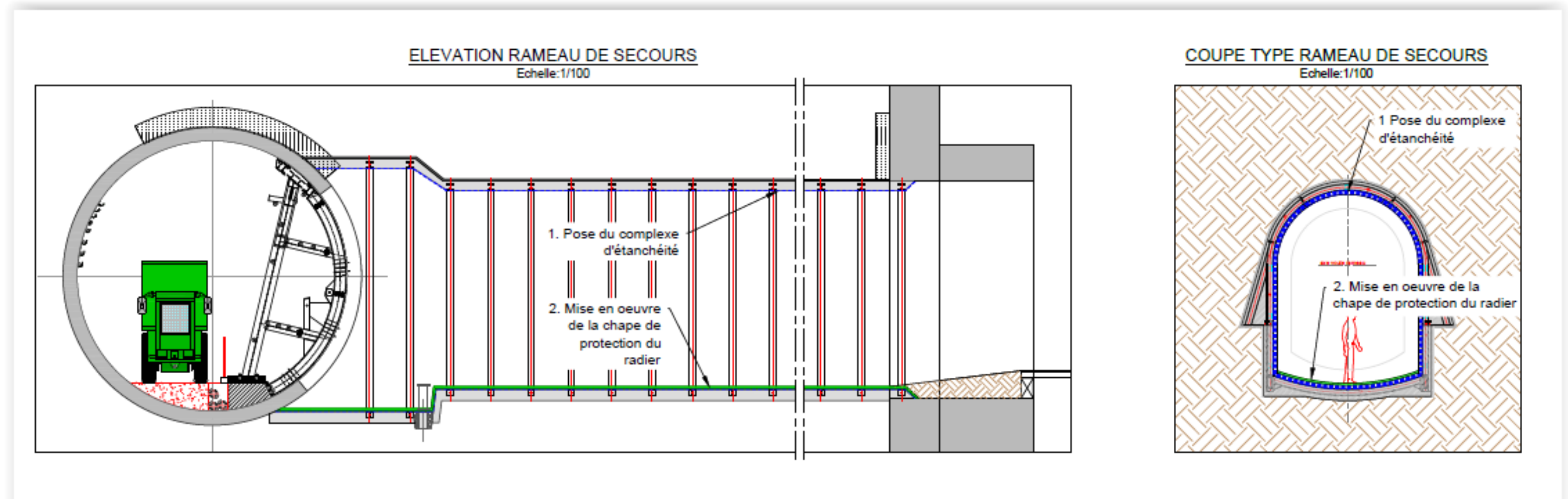


REX sur la congélation des sols des chantiers T2A
et T3A de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express

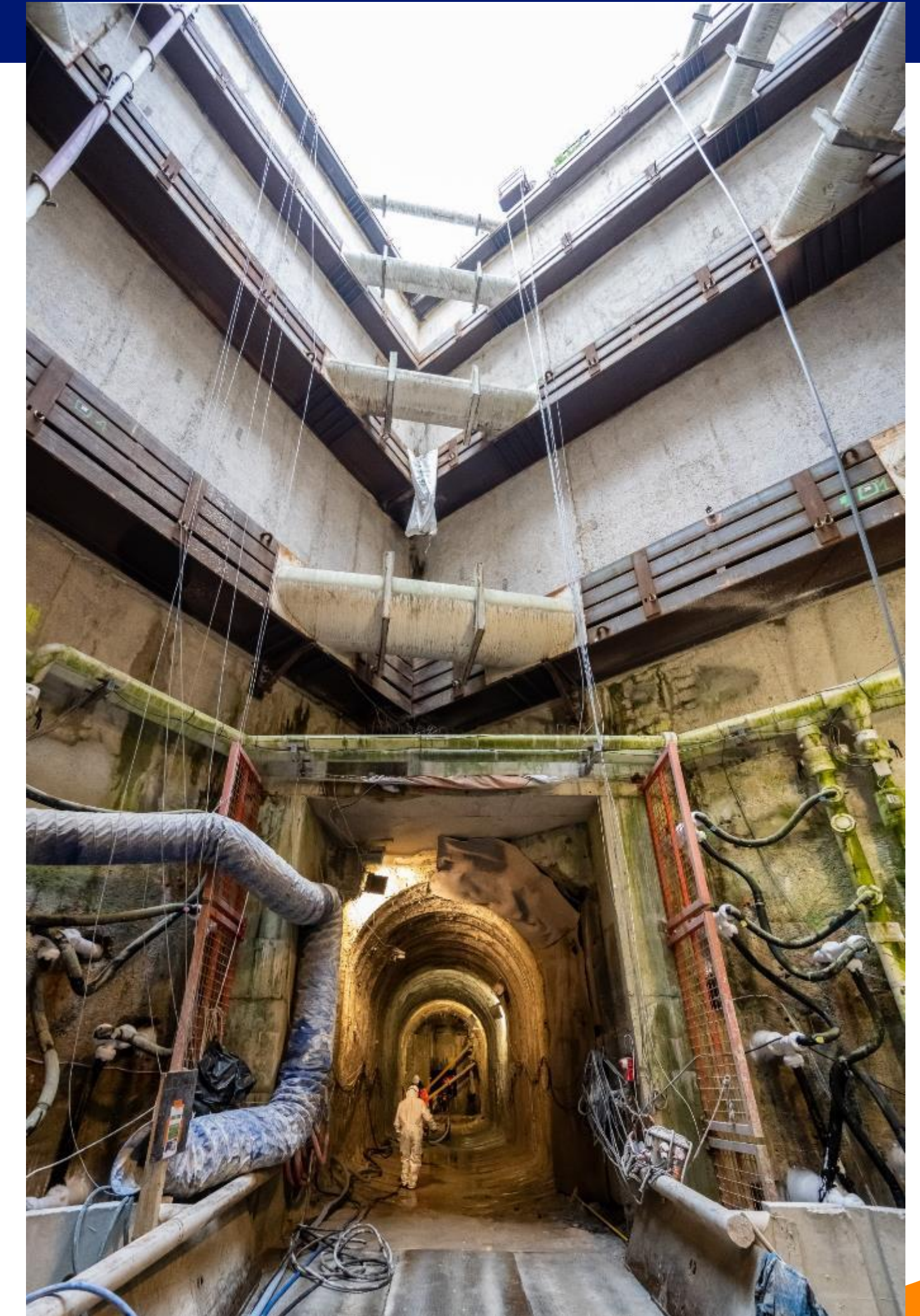
Présentation de l'ouvrage et de la congélation



Vue en plan et Coupe longitudinale du rameau de l'OA 1404

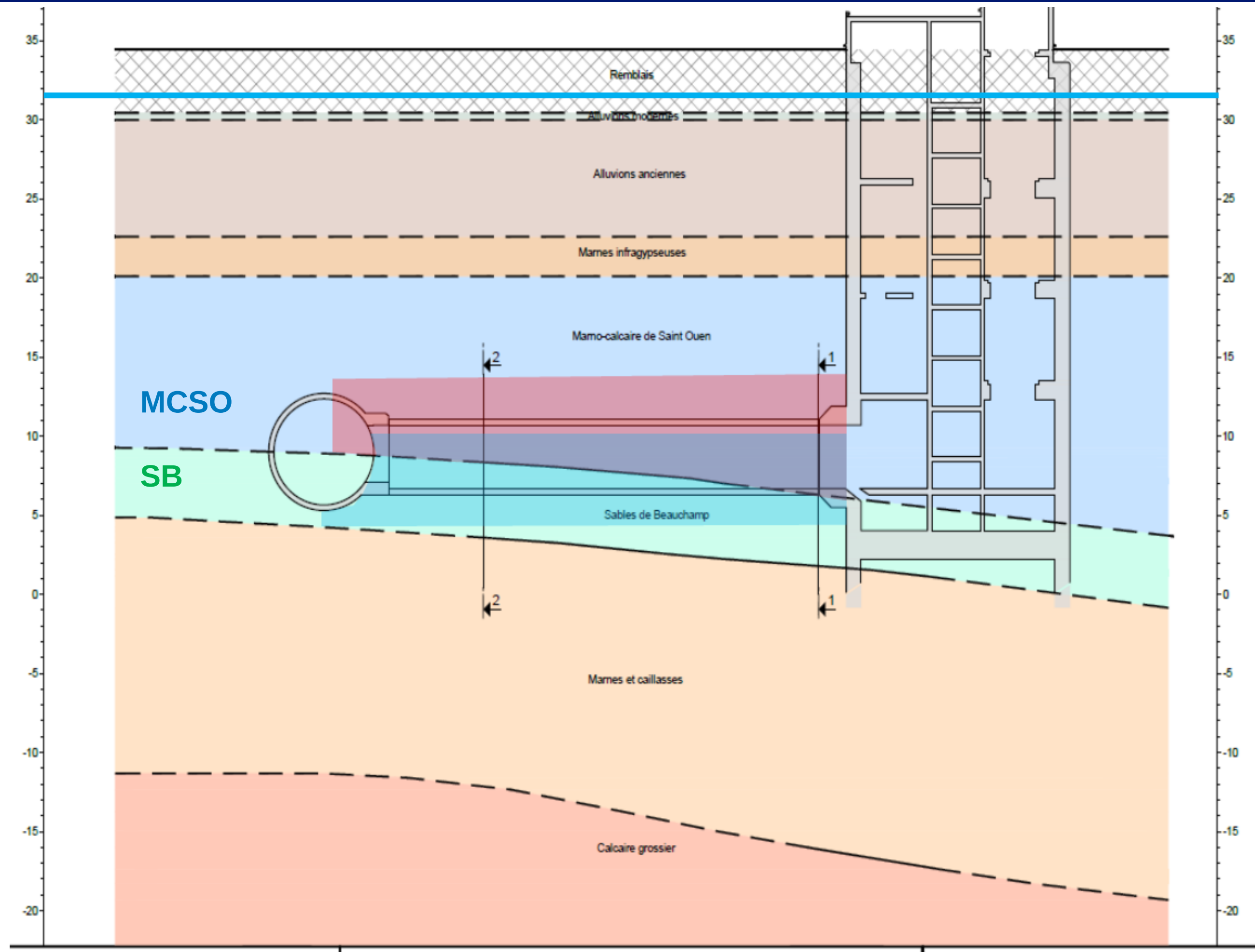


Présentation de l'ouvrage et de la congélation



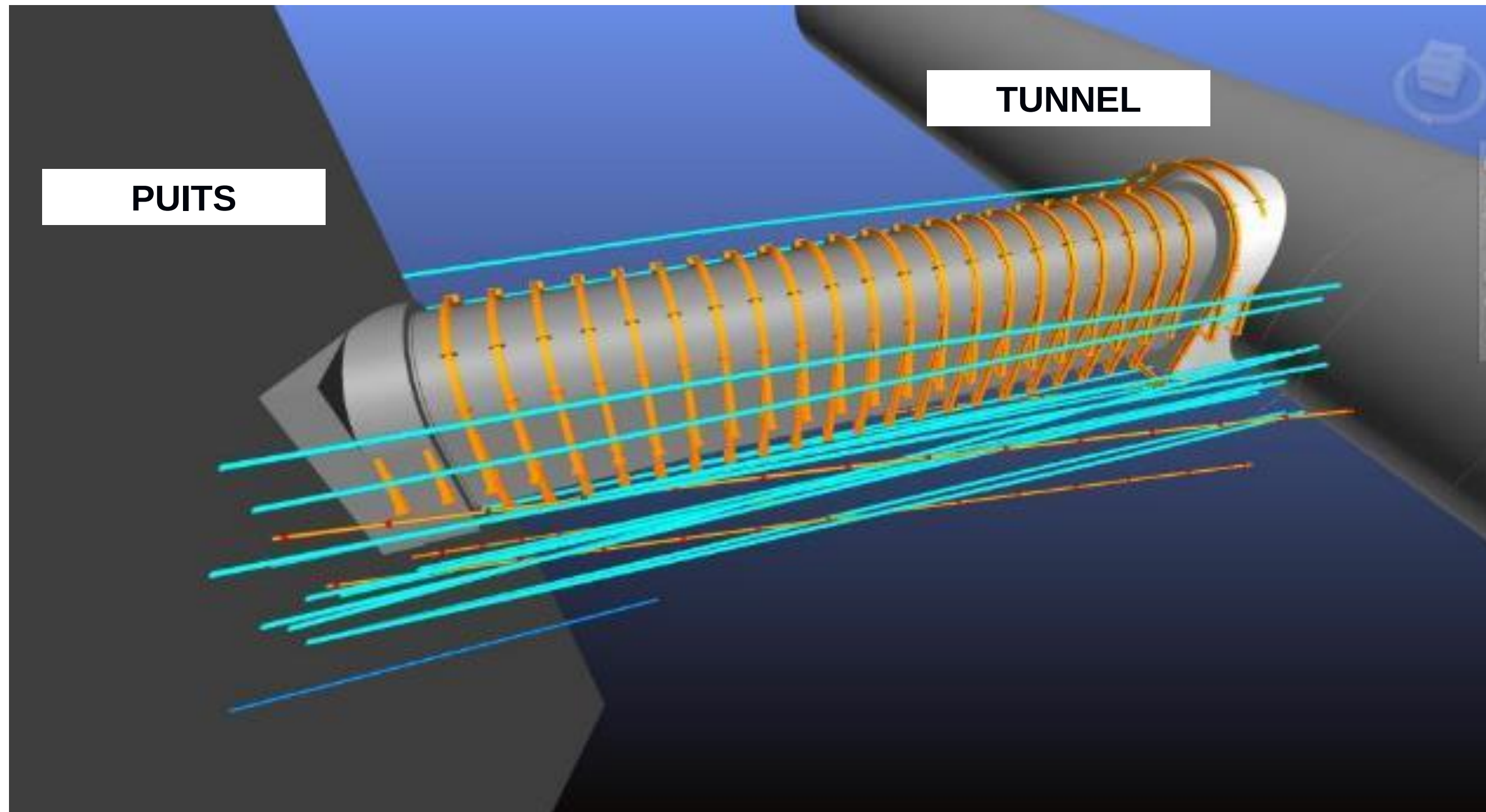
Présentation de l'ouvrage et de la congélation

Contexte géologique



REX sur la congélation des sols des chantiers T2A
et T3A de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express

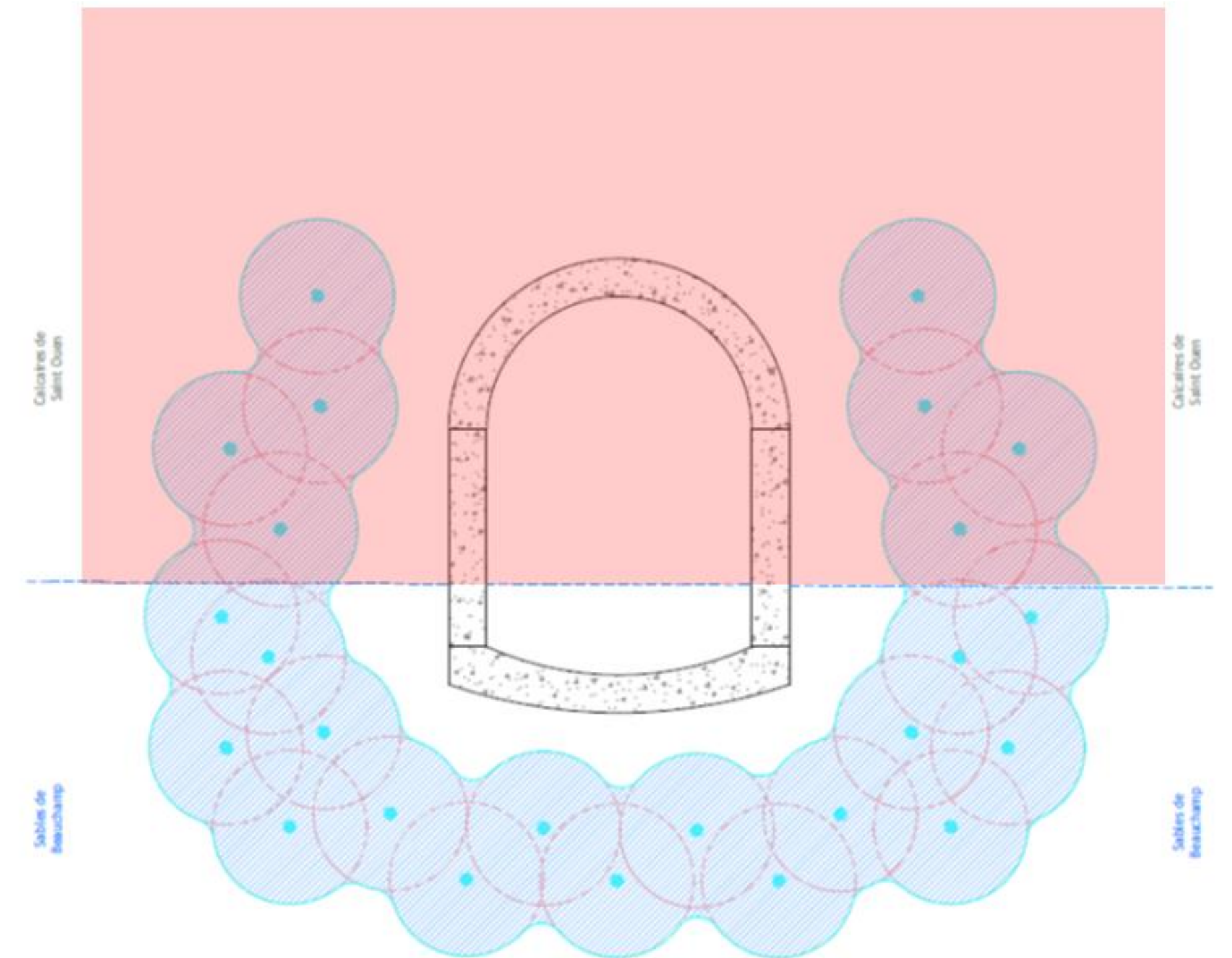
Présentation de l'ouvrage et de la congélation



Congélation en U avec ancrage dans le Calcaire de Saint Ouen préalablement injecté

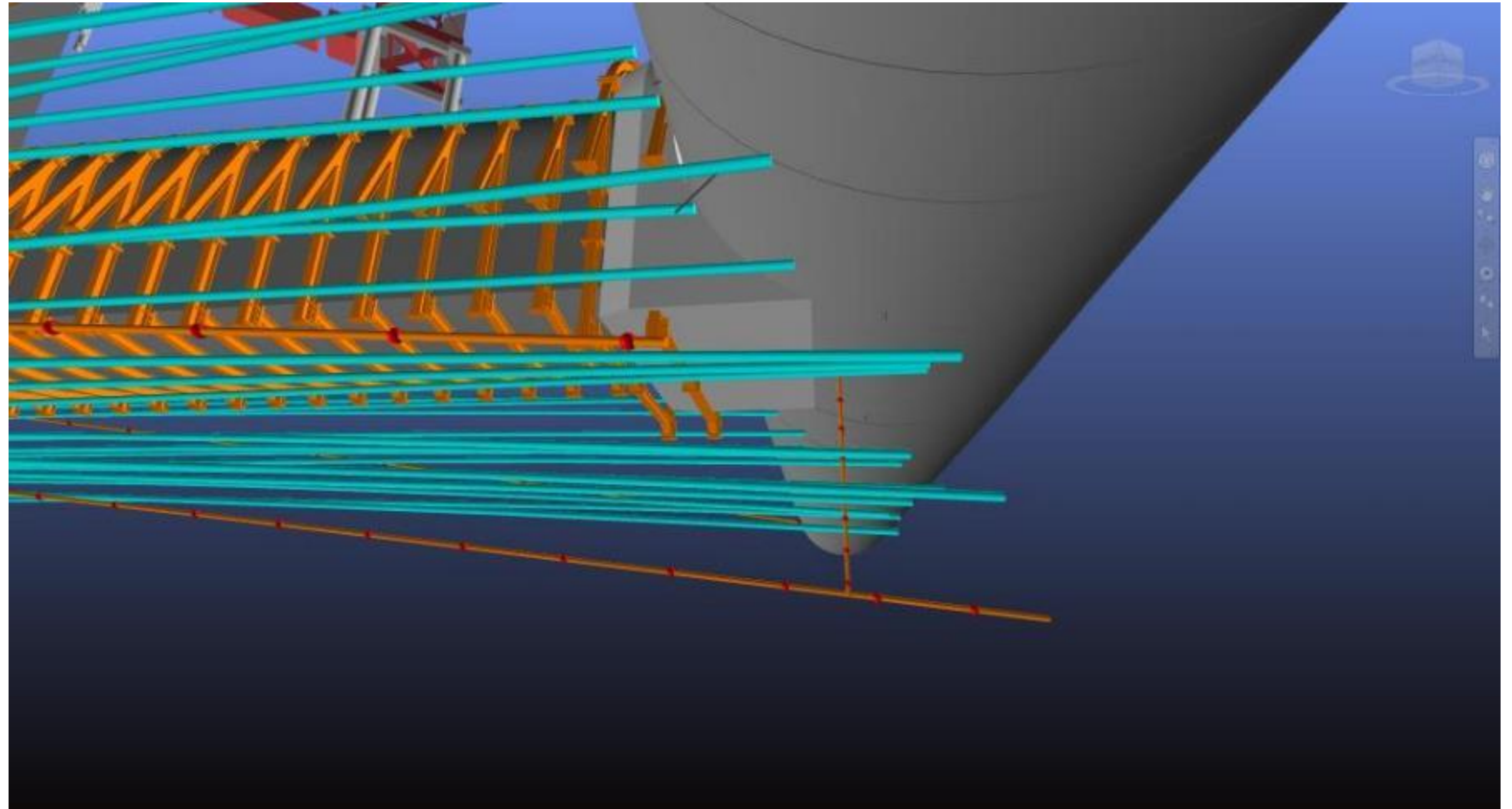
Critères initiaux de congélation

- 1m d'épaisseur à -10°C en piédroits et en radier
- 1m40 d'épaisseur à -10°C à la jonction piédroits / radier
- 50cm d'épaisseur à -5°C pour le collage.



Présentation de l'ouvrage et de la congélation

Collage de la congélation au tunnel

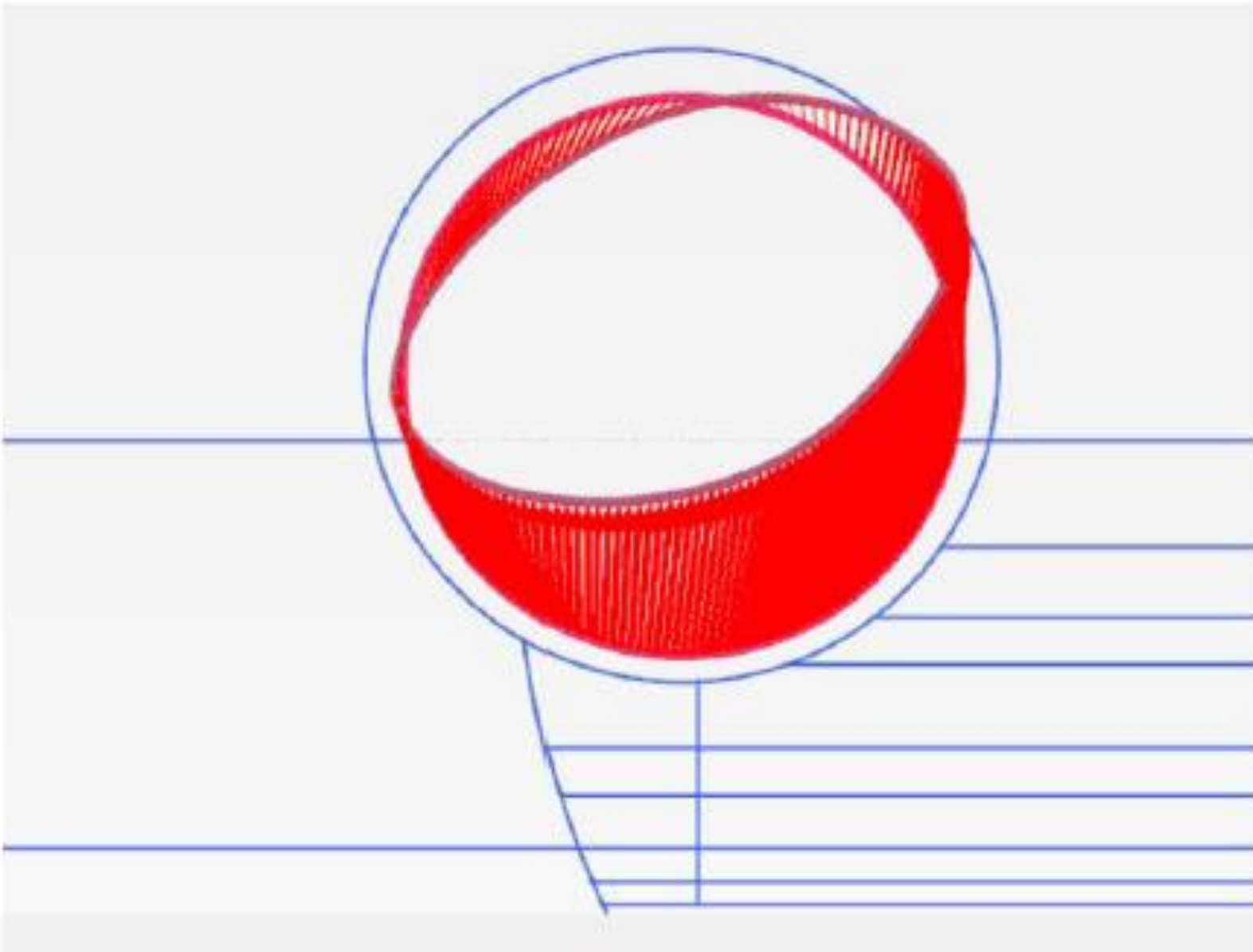


Congélation et déformation du tunnel

Date	Constats	Actions
02/03/22	Suite au REX de VDM, décision est prise de mettre en froid par paliers décroissants de température (paliers d'1 semaine)	Démarrage MEF (Mise En Froid) à -15°C
04/03/22	Début des mouvements constatés sur le tunnel. Vitesses de convergence comprise entre 0 et 0,3mm/jour selon les profils.	
09/03/22	Convergence max = 2mm	Baisse de la température de congélation à -20°C
10/03/22	Accélération de la convergence du tunnel. Vitesse de convergence comprise entre 0 et 0,6mm/jour selon les profils.	
10/03 au 08/04/22	Les pente de convergence sont constantes. Aucune tendance à la baisse. On constate progressivement des désaffleurements entre anneaux et un léger déplacement des parois moulée du puits.	Etudes des possibilités de confortement du tunnel
08/04/22	Convergence max = 18mm.	Augmentation de la température de congélation à -15°C
09/04/22	Baisse de la vitesse de convergence comprise entre 0 et 0,2mm/jour selon les profils.	On conserve une congélation à -15° pour éviter la décongélation qui pourrait poser plus de problème.
21/04/22	Vitesse de convergence constante. Atteinte de 20mm de convergence sur certains profils.	Arrêt de 6 (sur 12) congélateurs en radier afin de stopper le développement de la glace et ralentir les convergences.
11/05/22	Vitesse de convergence à la baisse entre 0 et 0,15mm/jour. Convergence max = 23,8mm. Les épaisseurs de glace sont stabilisées	Les épaisseurs de glace sont stabilisées. Renforcement des dispositions de contrôle de la congélation dans et sous le tunnel.

Déformations maximales relevées dans le tunnel:

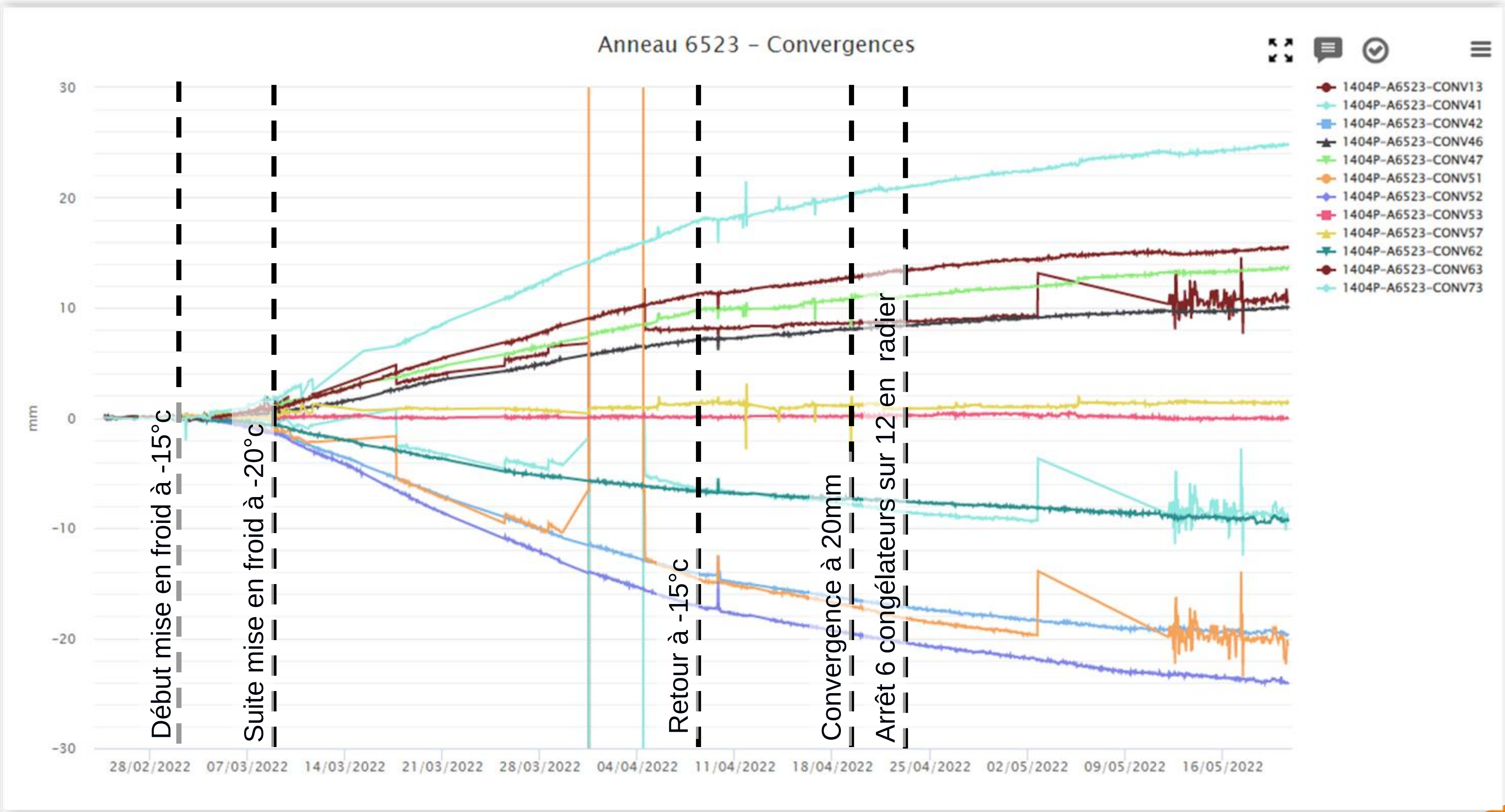
- A 60 jours de mise en froid: 25 mm
- A 90 jours de mise en froid: 30 mm



Congélation et déformation du tunnel



Chronologie des événements



REX sur la congélation des sols des chantiers T2A
et T3A de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express

Congélation et déformation du tunnel

Après 2,5 mois de mise en froid, les constats sont les suivants :

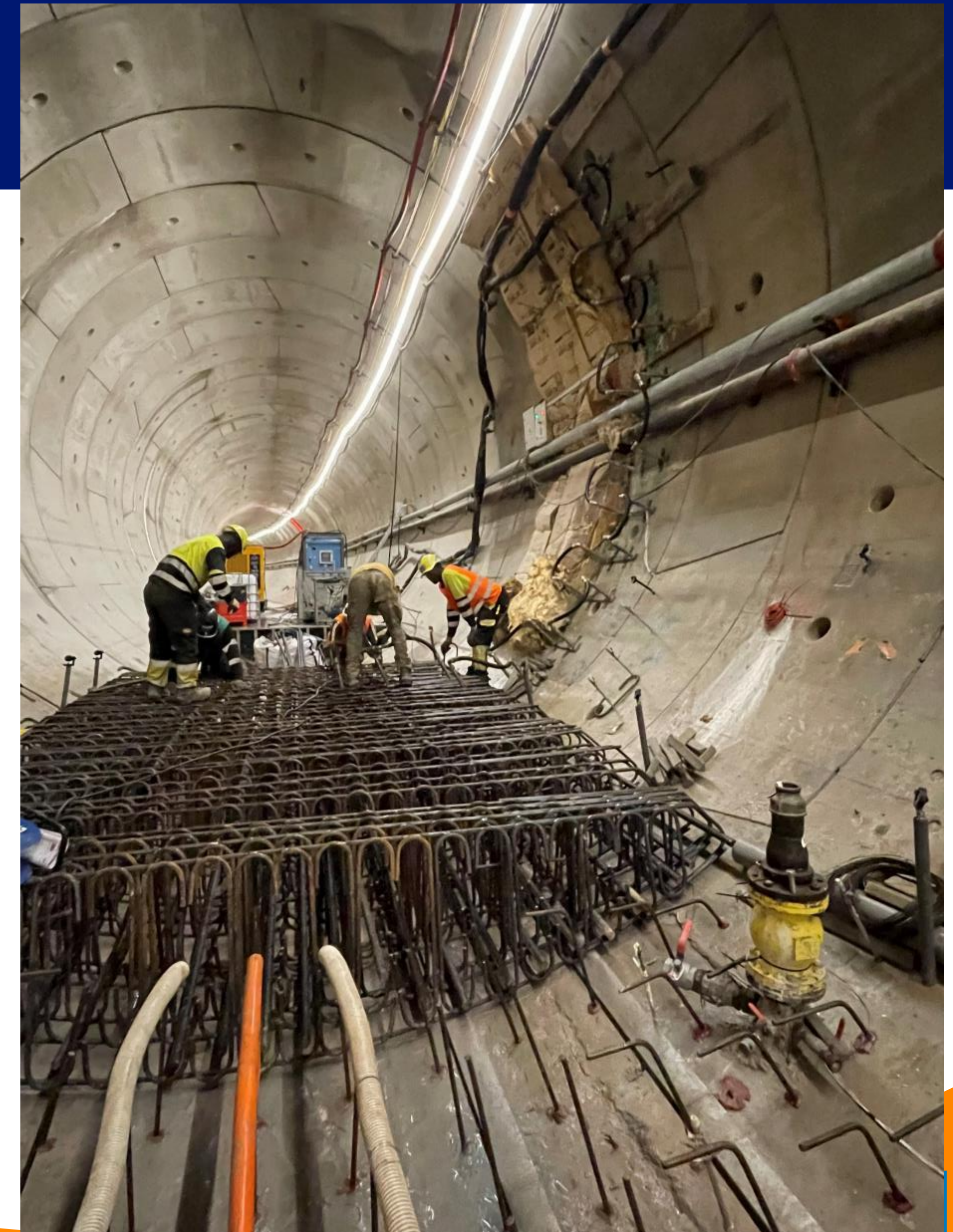
- Une mise en froid par paliers de T°C qui n'a pas ou très peu apportée en terme de réduction de soulèvements. Un facteur d'expansion équivalent à celui de VDM.
- Les convergences / soulèvements tendent à se stabiliser du fait du retour à -15°C => **OK**
- La température de -15°C ne permet pas le collage de la congélation au tunnel => **Pas OK**
- La température de -15°C ne permet pas l'atteinte des critères mécaniques pour la congélation (nécessité de -30/-35°C) => **Pas OK**

=> Impossibilité d'atteindre les critères de congélation (mécanique et étanchéité) sans dépasser les critères de déformation du tunnel (convergence max = 32mm).

Solutions mises en œuvre par la suite :

- Renforcement du tunnel permettant une rehausse des critères de déformation (convergence jusqu'à 50mm).
- Réévaluation des critères mécaniques (en considérant une épaisseur à -7°C et non -10°C en dégradant les propriétés)
- Mise en place d'un dispositif de congélation dans le tunnel afin de faciliter le collage de la glace aux voussoirs => Ce dispositif devant permettre de faciliter le collage tout en limitant le développement de la glace sous le tunnel.

Congélation et déformation du tunnel



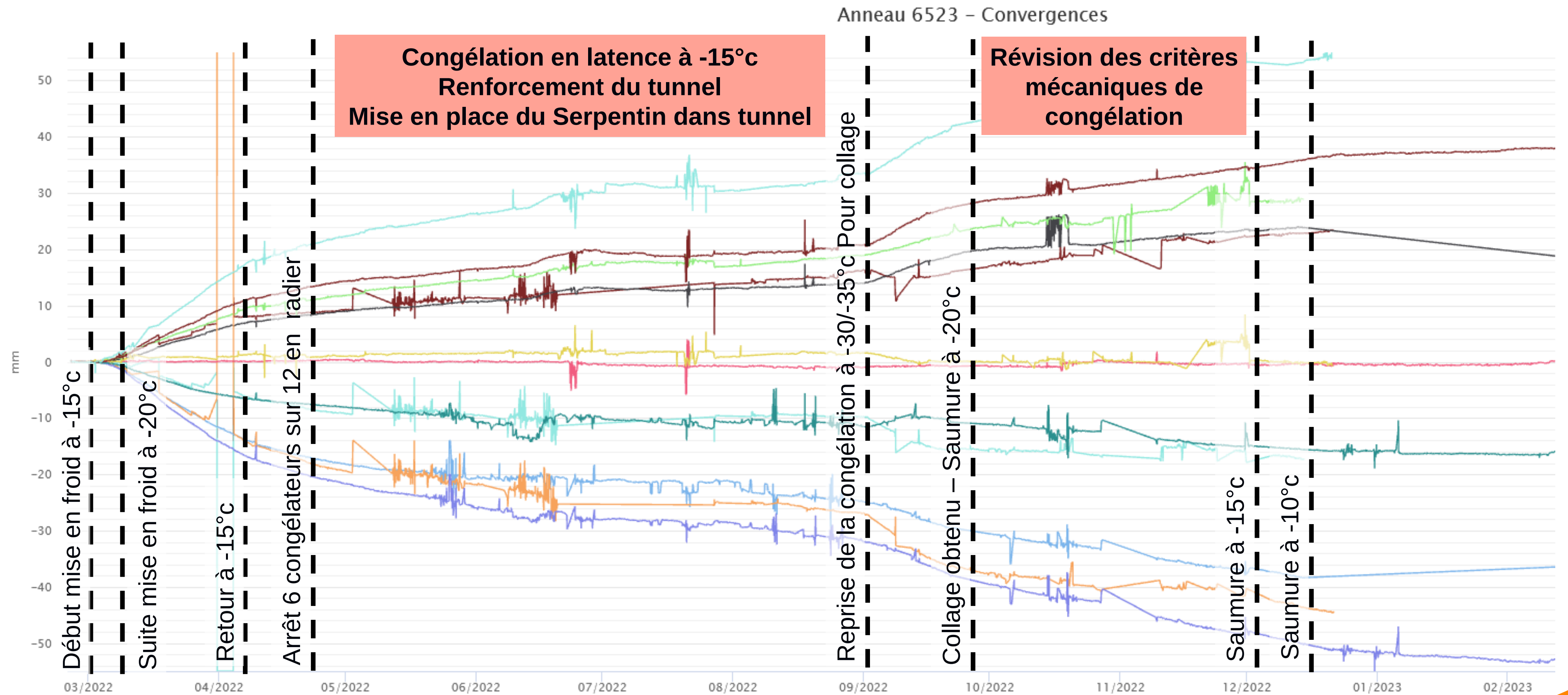
REX sur la congélation des sols des chantiers T2A
et T3A de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express

Congélation et déformation du tunnel



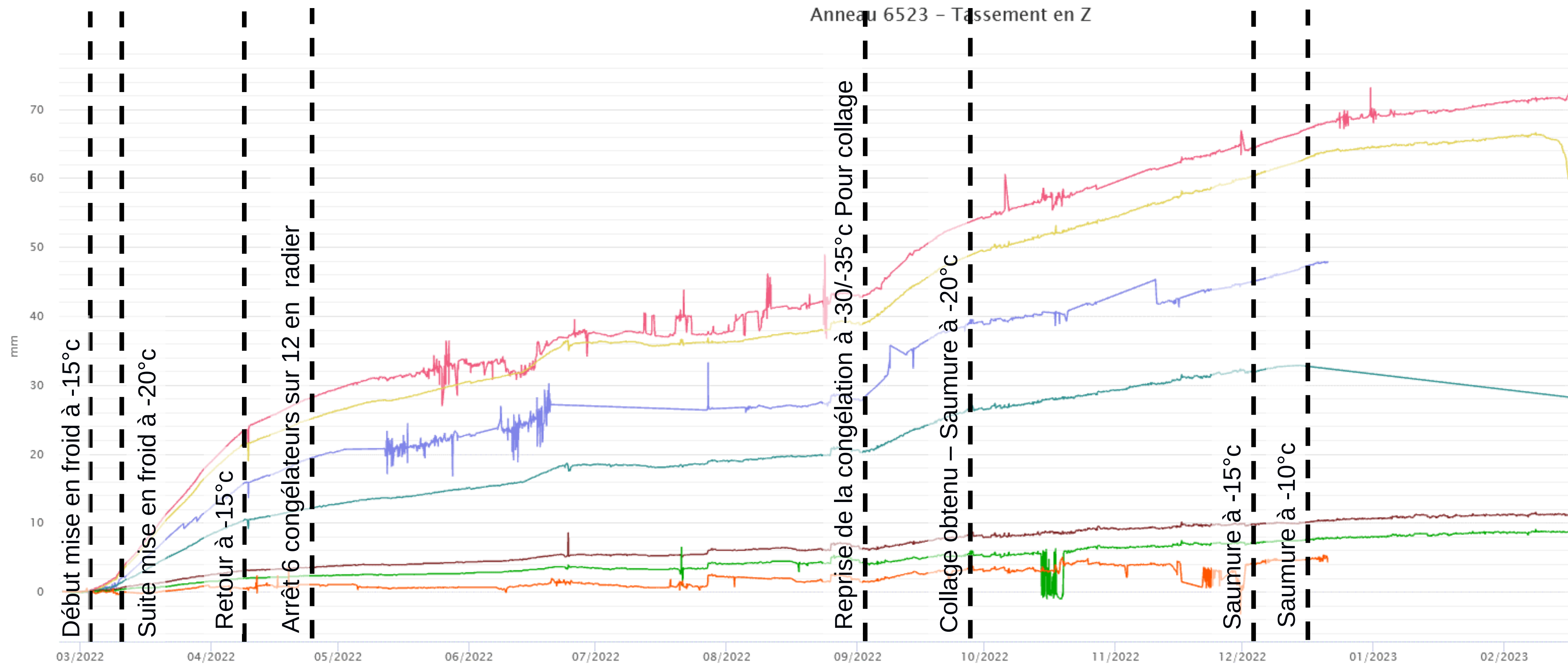
Congélation et déformation du tunnel

Malgré tout ...



Congélation et déformation du tunnel

Malgré tout ...



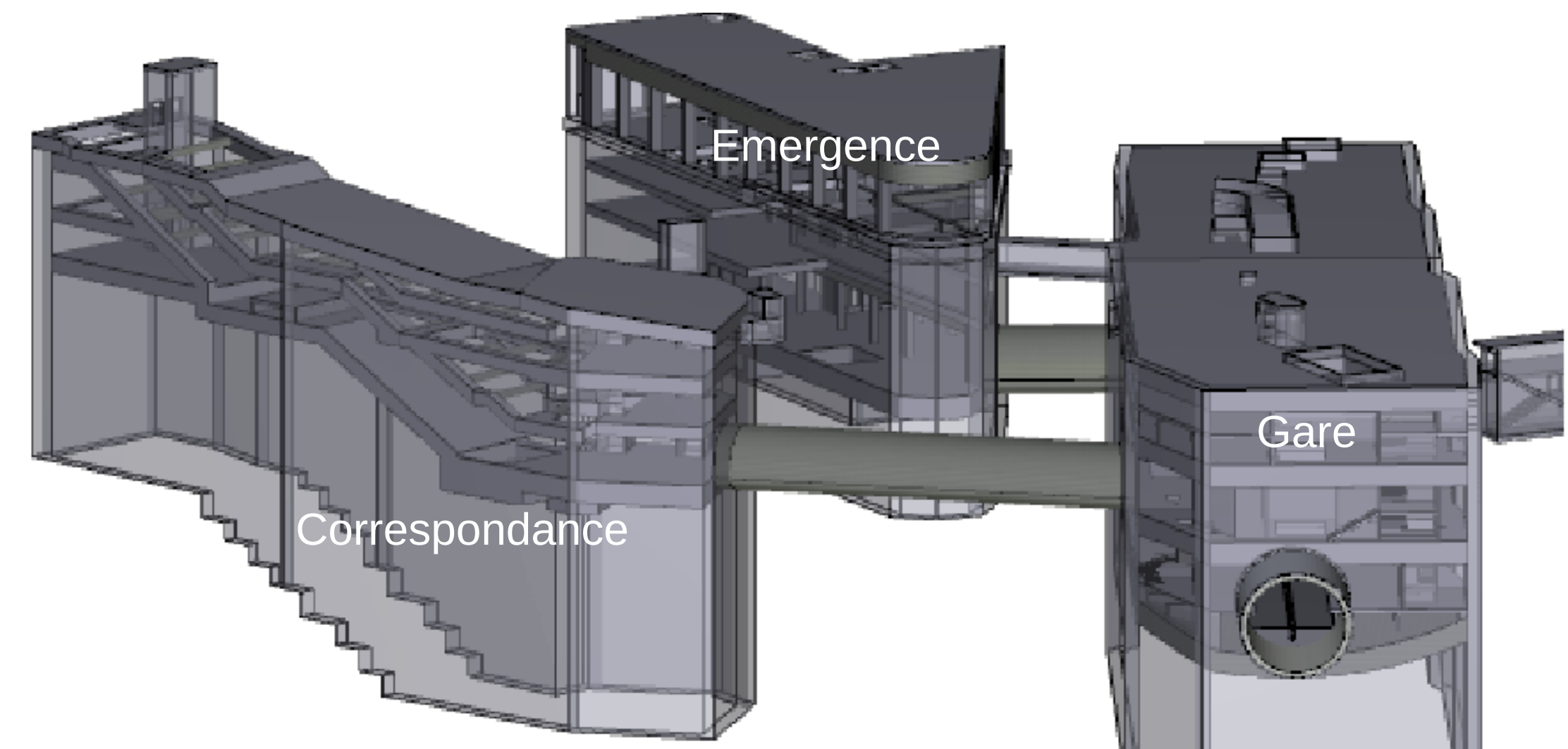
REX T3A – ISS

Gare d'Issy les Moulineaux



REX sur la congélation des sols des chantiers T2A
et T3A de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express

Situation des 2 couloirs congelés : EME et COR de la gare Issy RER



Un environnement particulièrement sensible avec la présence de réseaux à l'aplomb

Réseau SIAAP (EU / EP)



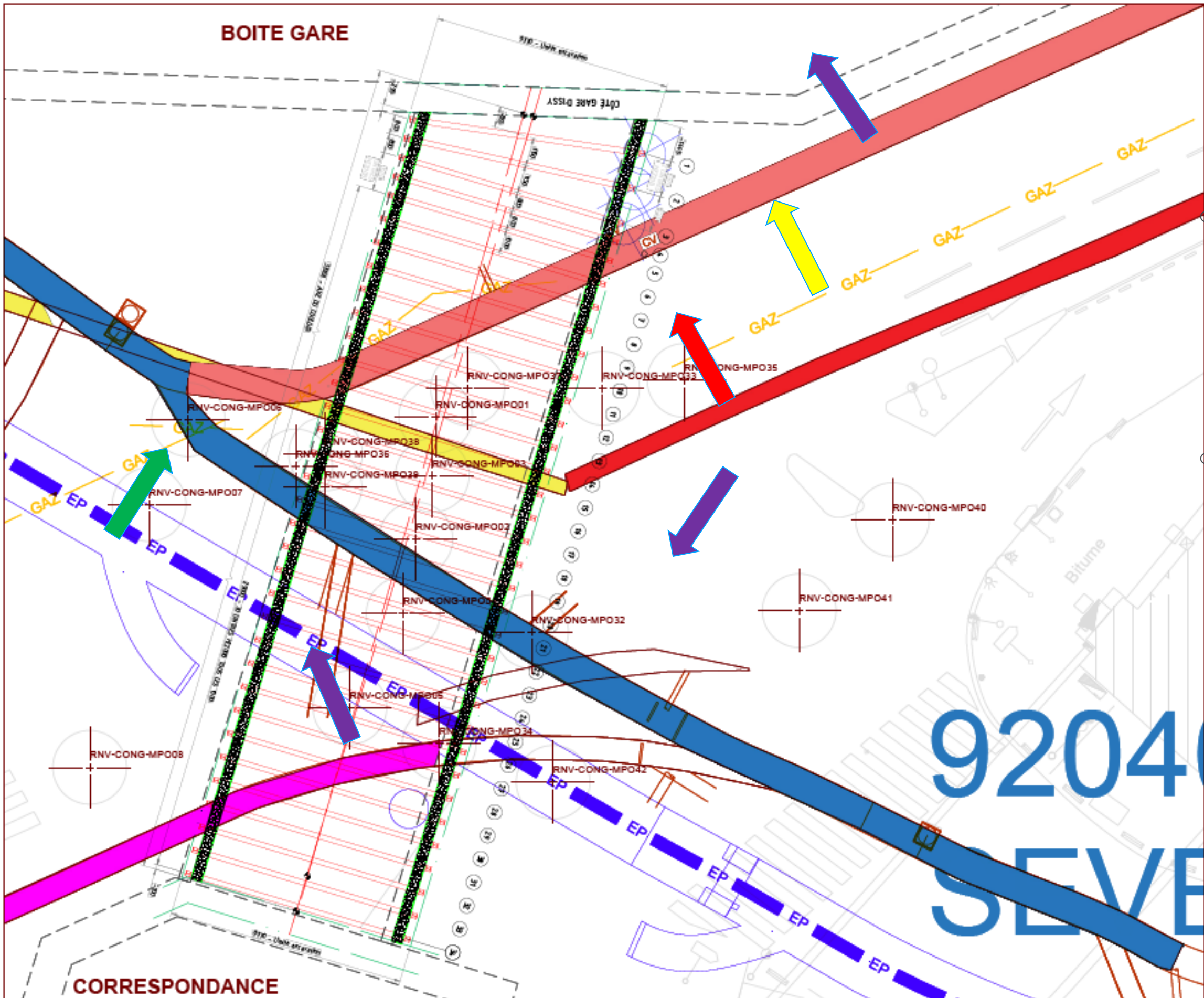
- Epoque de construction: 1936-1959
- Section : Circulaire, de diamètre intérieur 2,75m
- Matériau: Maçonnerie de meulière 0,3 à 0,5m d'épaisseur + enduit
- Profondeur: 26,8NGF (TN 34 à 38NGF)
- Renforcement: Oui (2018)
25cm de renforcement B/A depuis 26/10/2022
- Visite du réseau :

Réseau SEVESC (EU / EP)



- Epoque de construction: <1950
- Section : Ovoïde 2,3m x 1,3m
- Matériau: Maçonnerie
- Profondeur: 27NGF (TN 34 à 38NGF)
- Renforcement: Oui (2018)
Injection de collage avec effet de régénération
Chemisage structurant en voûte, piédroits et radier
- Visite du réseau : Béton et enduit anti-abrasif en radier depuis 23/08/2022

Réseaux	Seuils contractuels		
	Tassement / Soulèvement	Mise en pente	Déformation horizontale
Sedif/Gaz	/	0,5‰	/
SEVESC/SIAAP	25 mm	1,5‰	0,5‰,



Réseau SEDIF (Eau Potable)



- Epoque de construction: 1974
- Section : Circulaire diamètre extérieur 800mm
- Matériau: Acier
- Profondeur: 28,7NGF (TN 34 à 35 NGF)
- Renforcement: Travaux de dévoiement (2017) => partie de réseau neuve

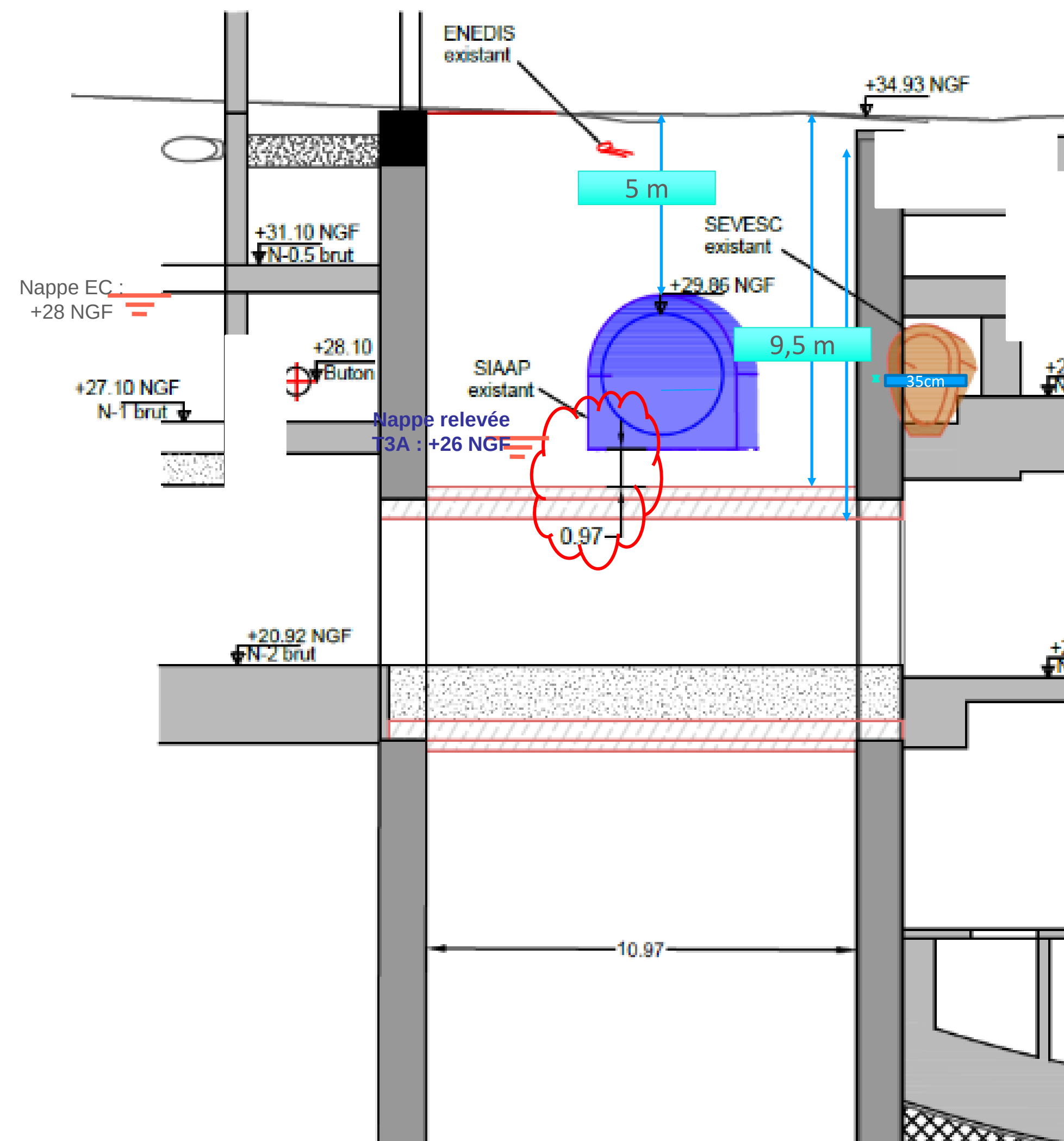
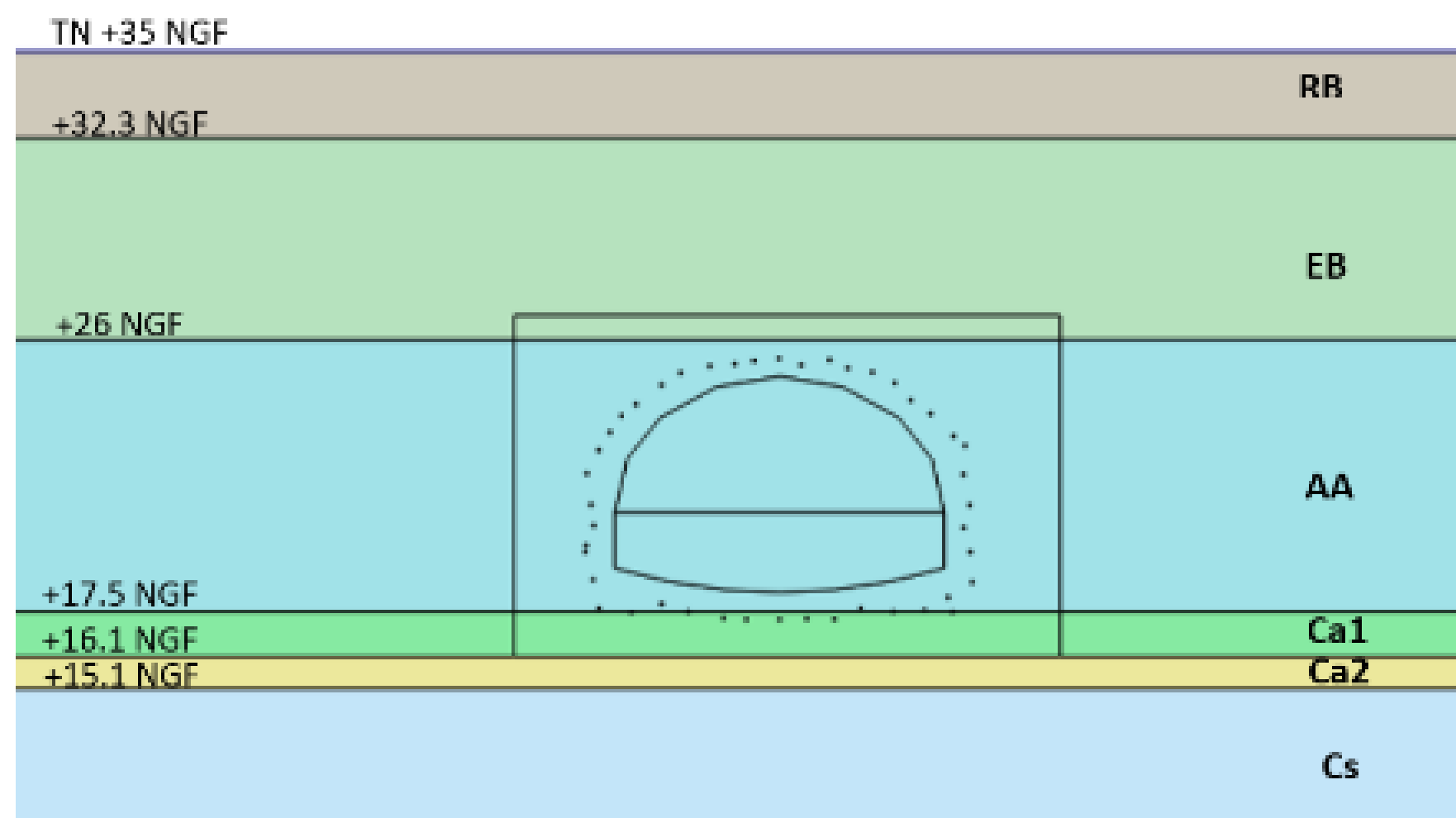
Réseau GRDF (distribution Gaz)



- Epoque de construction: Pas d'information
- Section : Circulaire diamètre 219mm
- Matériau: Acier
- Profondeur: 33NGF (TN 35 NGF)
- Renforcement: Pas d'information

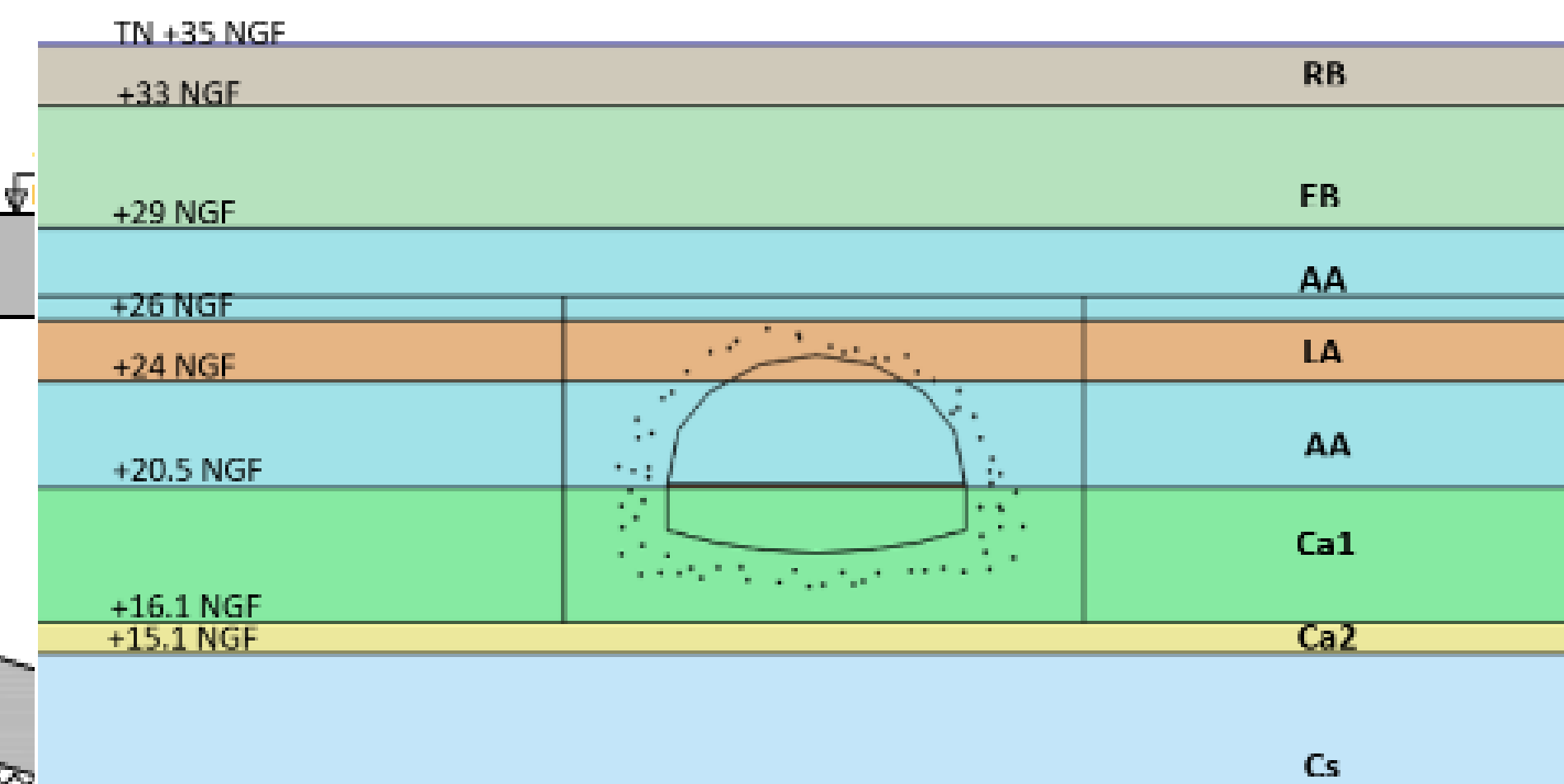
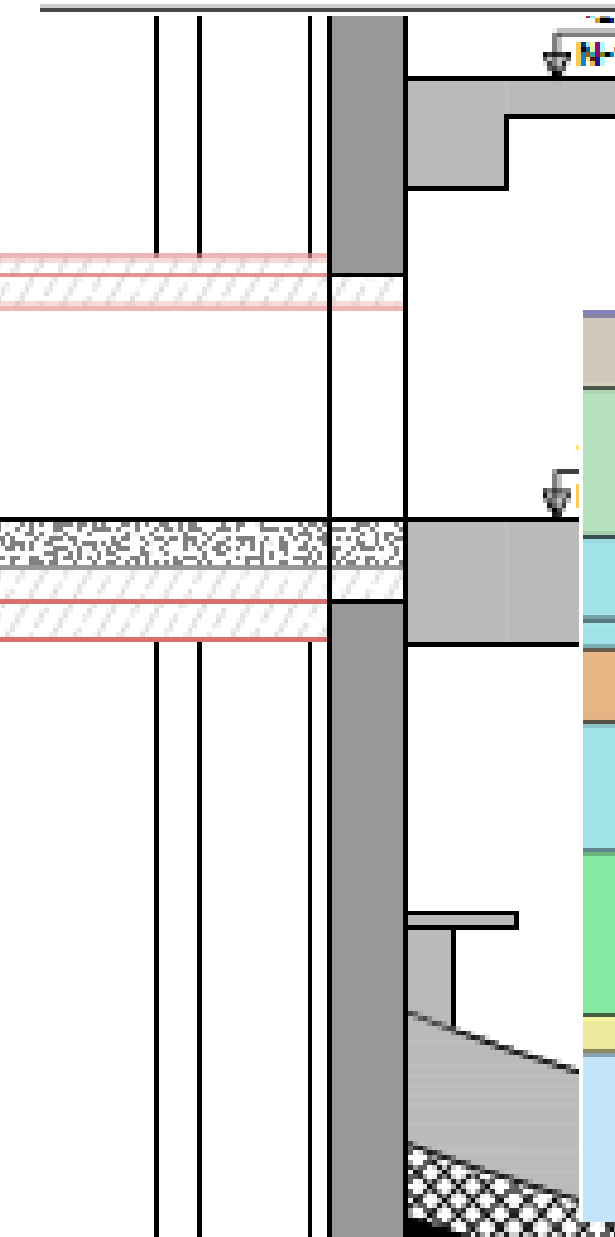
Couloir Emergence

- **EX**



Couloir Correspondance

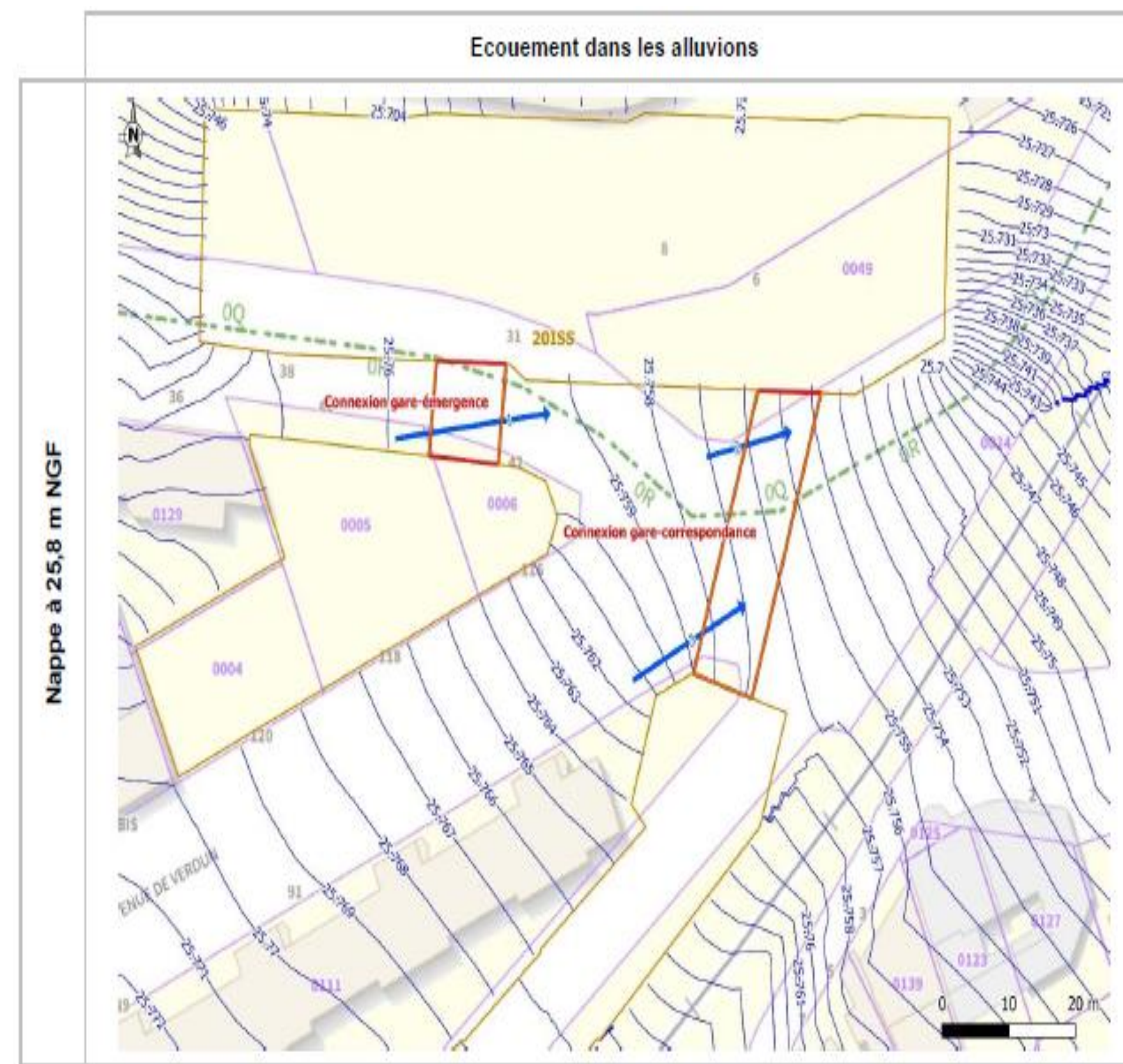
- **Excavation 10,07m*6,75m**



Gestion du risque lié à la vitesse d'écoulement de la nappe

NOTRE APPROCHE SUR LES VITESSES D'ÉCOULEMENT :

- Calcul hydraulique confié au BE : BURGEAP qui a une bonne connaissance du comportement hydraulique du site et des paramètres de perméabilité, porosité cinématique et gradient des terrains.
- Modélisation de la boucle de la Seine pour définition des différents scénarios => pris en compte dans les calculs.
- Importance de l'évolution de la géométrie des lieux avec la construction des parois moulées des 3 boîtes (gare + EME + COR) qui affectent les écoulements.



Résultats de l'étude hydraulique BURGEAP

Gradient le plus défavorable donné par Burgeap

Couloir	Emergence	Correspondance
Gradient maximal (i_{max})	$1.5 \times 10^{-4} \text{m/m}$	$5 \times 10^{-4} \text{m/m}$

Comparaison vitesses d'écoulement estimées sur la base du Marché vs Burgeap

	Couloir correspondance				Couloir émergence			
	BURGEAP		Cahier B		BURGEAP		Cahier B	
	Vitesse darcy (m/j)	Vitesse réel (m/j)	Vitesse darcy (m/j)	Vitesse réel (m/j)	Vitesse darcy (m/j)	Vitesse réel (m/j)	Vitesse darcy (m/j)	Vitesse réel (m/j)
Alluvions	0,1	1,01	0,031	0,09	0,038	0,39	0,012	0,04
Craies	0,5	5,05	0,01	0,025	0,194	1,94	0,004	0,009

Conclusion : résultats études BURGEAP plus défavorables mais plus « réalistes » nous permettant de réaliser des études sécuritaires du point de vue d'écoulement des eaux et en plus d'obtenir des facteurs de sécurité calculatoires supplémentaires.

Hypothèses de gonflement de la glace suite au REX du T2A

- ✓ REX du projet T2A :
 - (expansion au changement de phase pour glace pure = 9%) x (porosité = 40%) → gonflement théorique maximal = 3,6%
 - perméabilité = 10^{-6}
 - essais Labo CDM Smith + avis expert / contexte terrain => valeur calcul retenue = 1%
 - valeur constatée (extrapolée d'après les soulèvements mesurés) = 2,7 %
- ✓ Le contexte du projet T3A est notablement différent de par la nature des terrains :
 - SB & MC (T2A) → AA & Craie (T3A)
 - porosité = 34% → gonflement théorique maximal = 3,1% soit 15% de moins que T2A
 - perméabilité = $1,5 \cdot 10^{-4}$ (EME) et $5 \cdot 10^{-4}$ (COR) soit 150 à 500 x plus perméable que T2A
 - valeur calcul retenue = 1% (REX pour ce type de terrain très perméable)
- ✓ En conclusion le contexte du T3A est bcp moins propice aux phénomènes de gonflement. Cependant afin de se mettre du côté de la sécurité, nous avons réalisé une étude de sensibilité prenant en compte un gonflement de 2%.

Installations de congélation

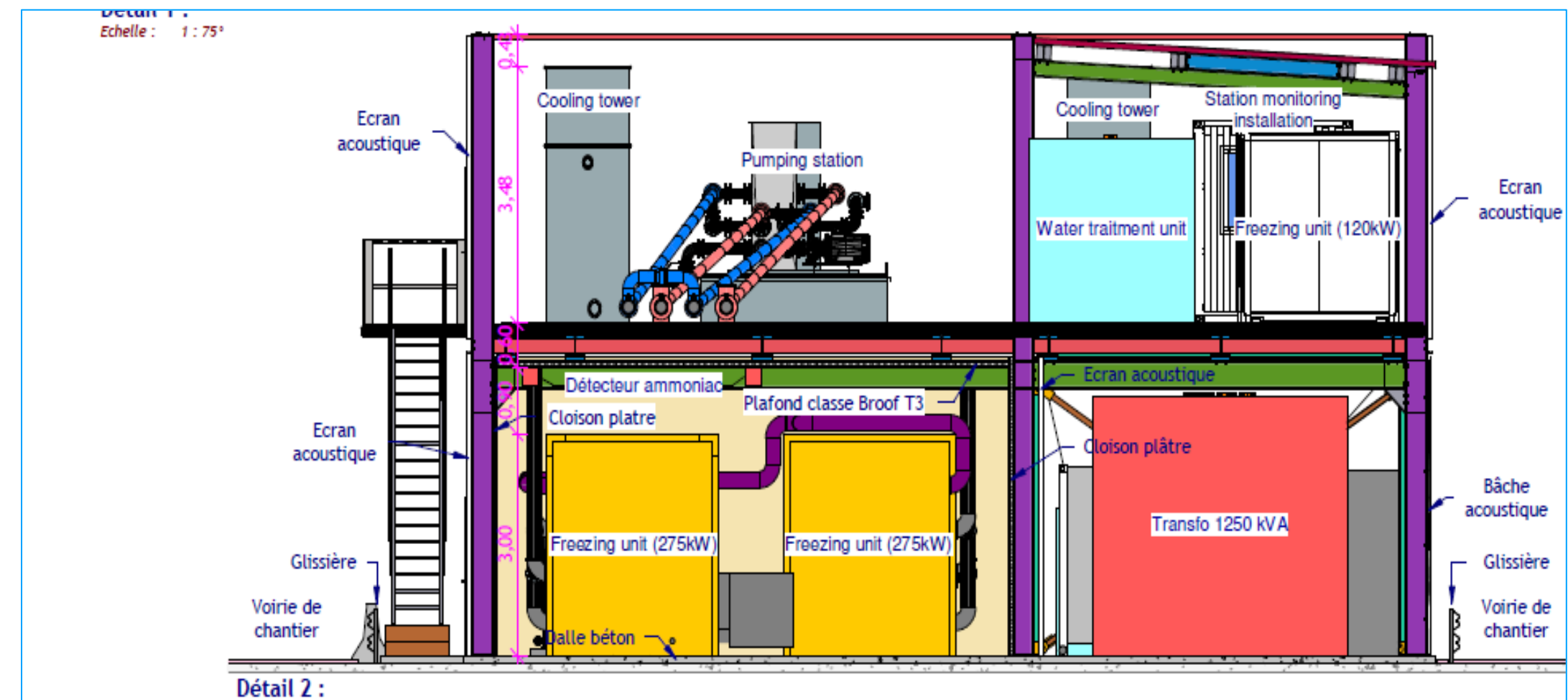
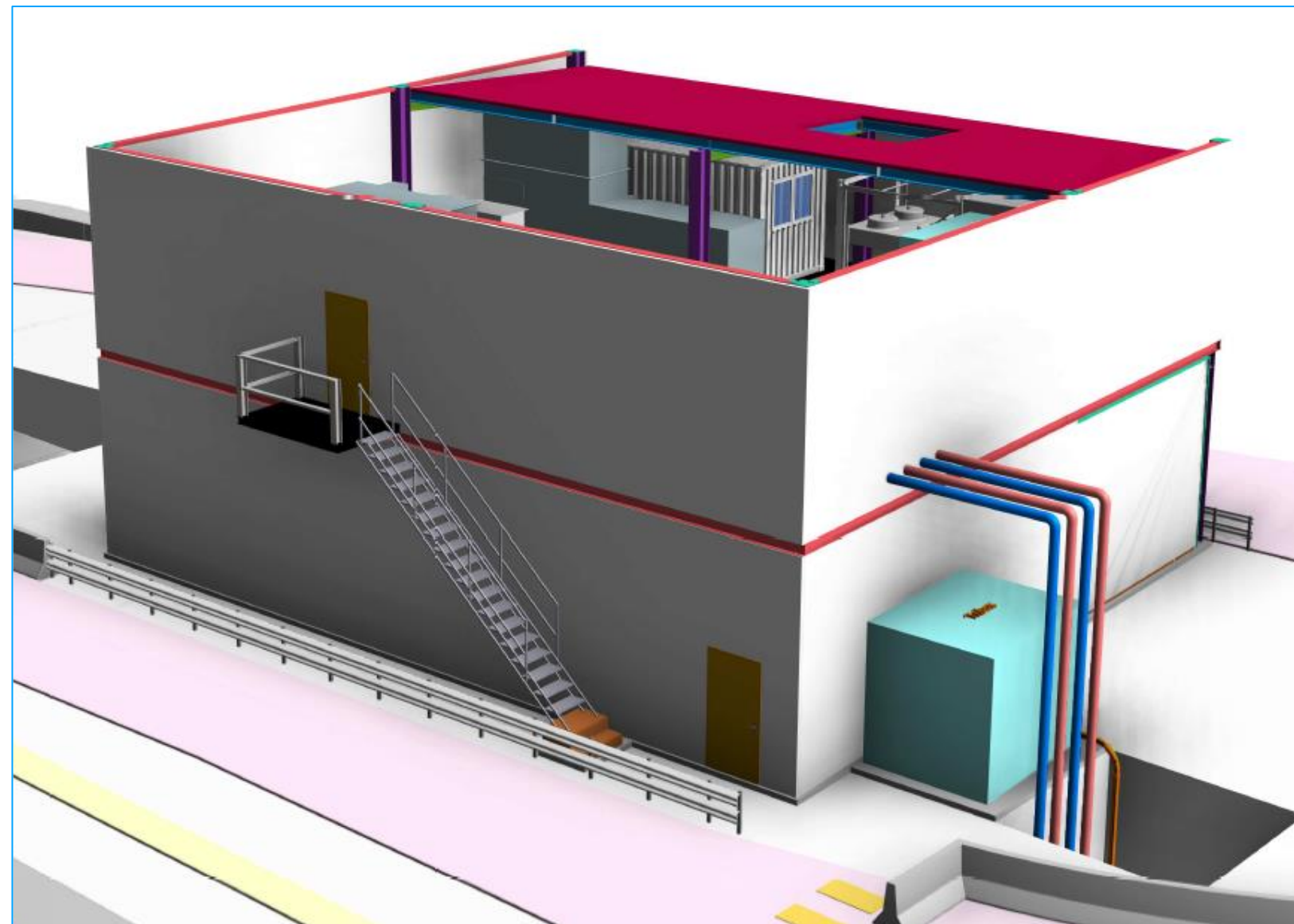
Une centrale frigorifique principale pour tous les congélateurs EME et les congélateurs horizontaux de COR. Cette centrale est composée de :

- 2 groupes frigorifiques de 275 kW
- 1 groupe frigorifique de 120 kW
- 2 tours de refroidissement
- 1 station de pompage (0-270 m³/h)

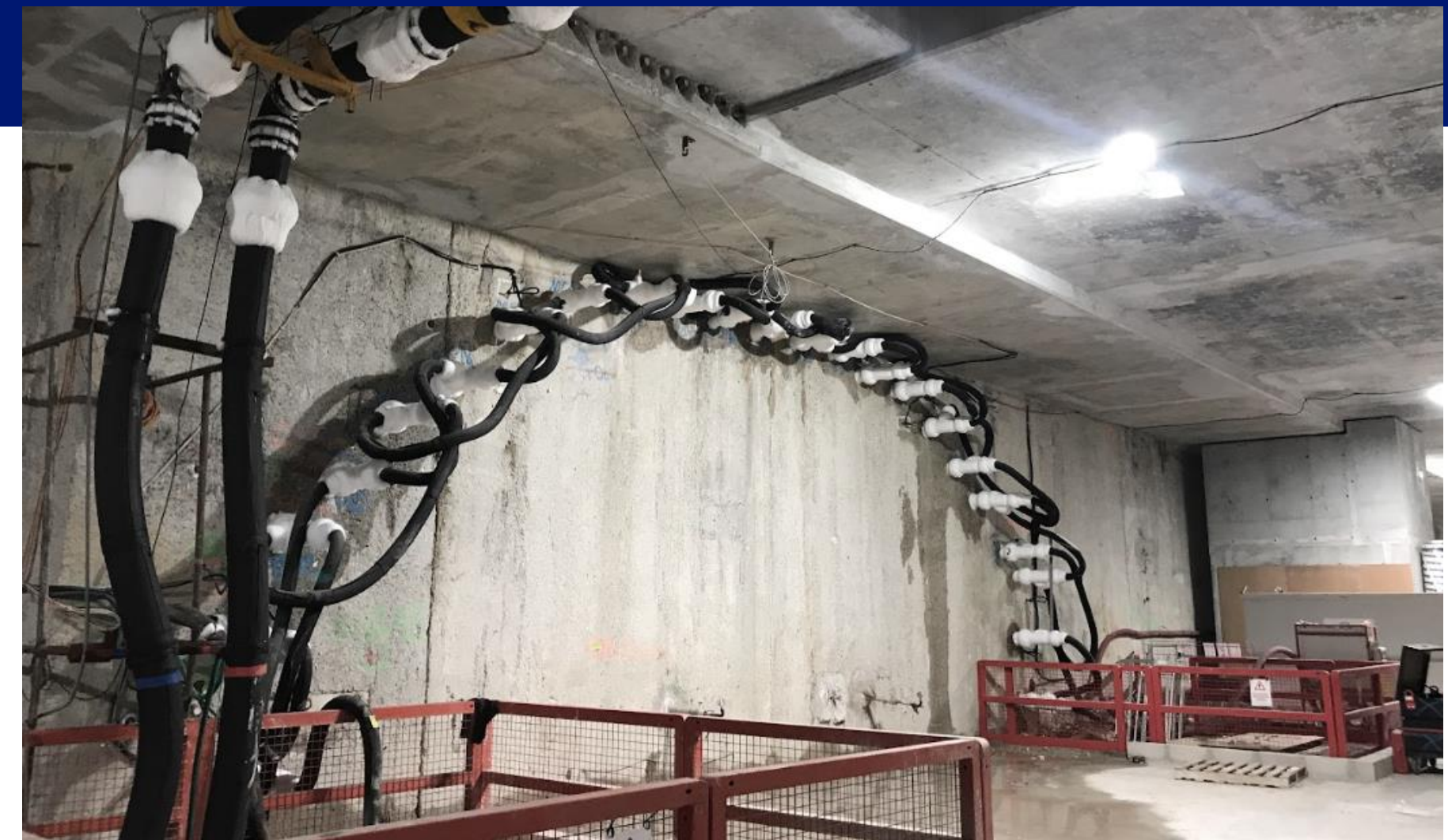
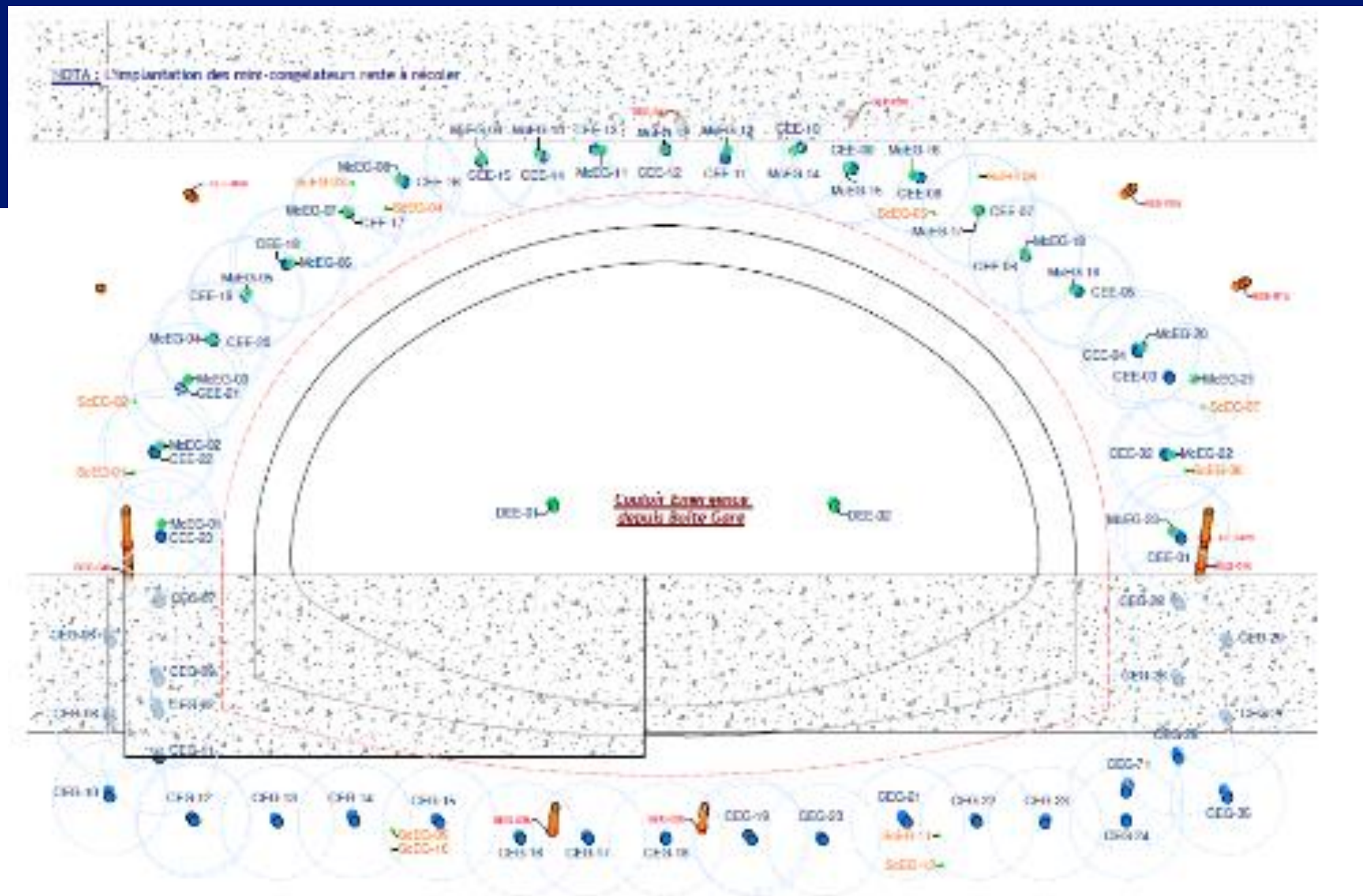
Une centrale frigorifique secondaire alimentant les congélateurs verticaux de COR (dans et le long de paroi moulée COR pour le collage). Cette centrale est composée de :

- 2 groupes de 60 kW

Soit une puissance totale disponible de 790 kW à -35°C



Emergence : Congélateurs et sondes – Depuis Boite Gare



Congélateurs :

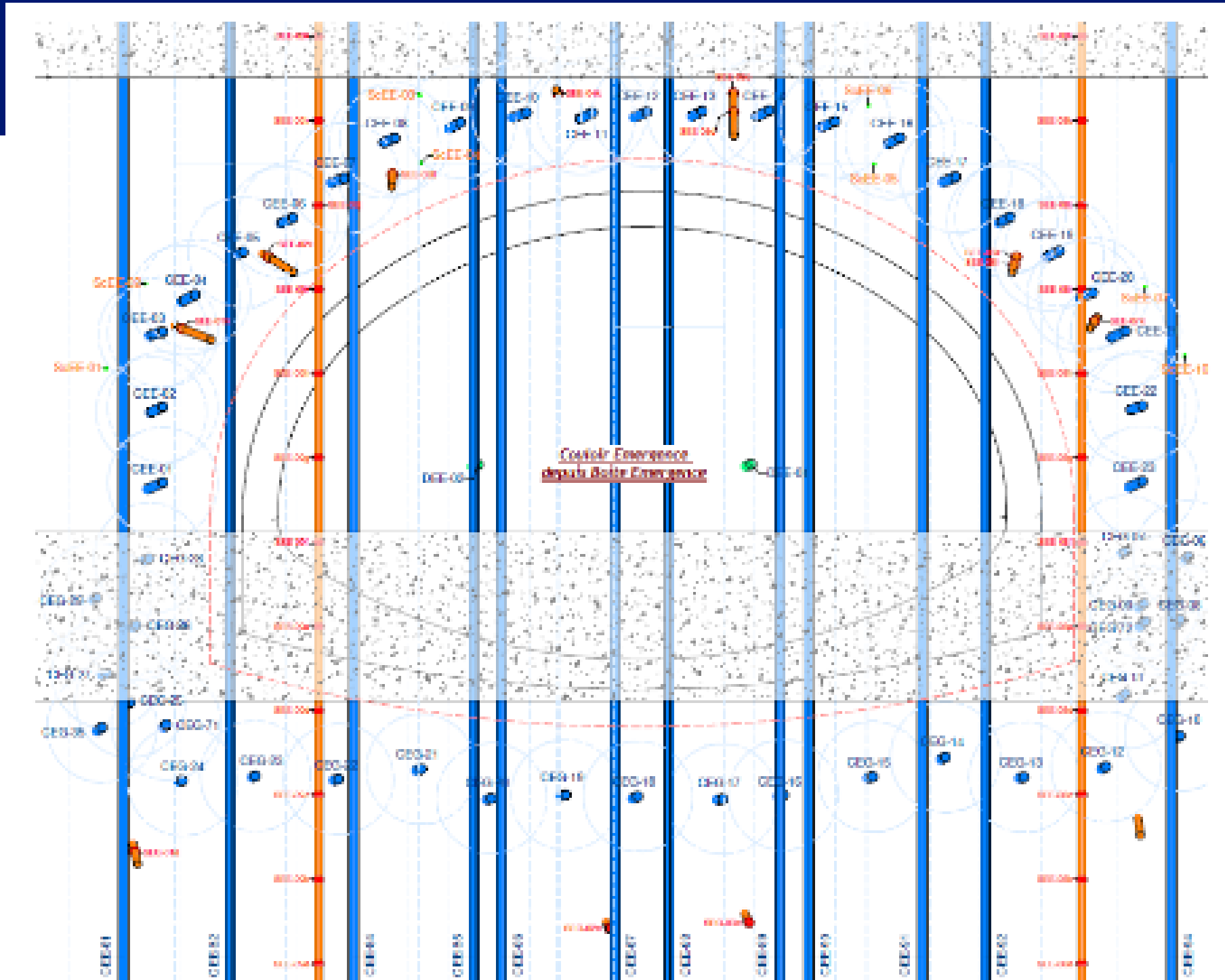
- 23 mini-congélateurs
- 27 congélateurs horizontaux

Sondes :

- 12 sondes de contact
- 4 sondes horizontales



Emergence : Congélateurs et sondes – Depuis Boite Emergence



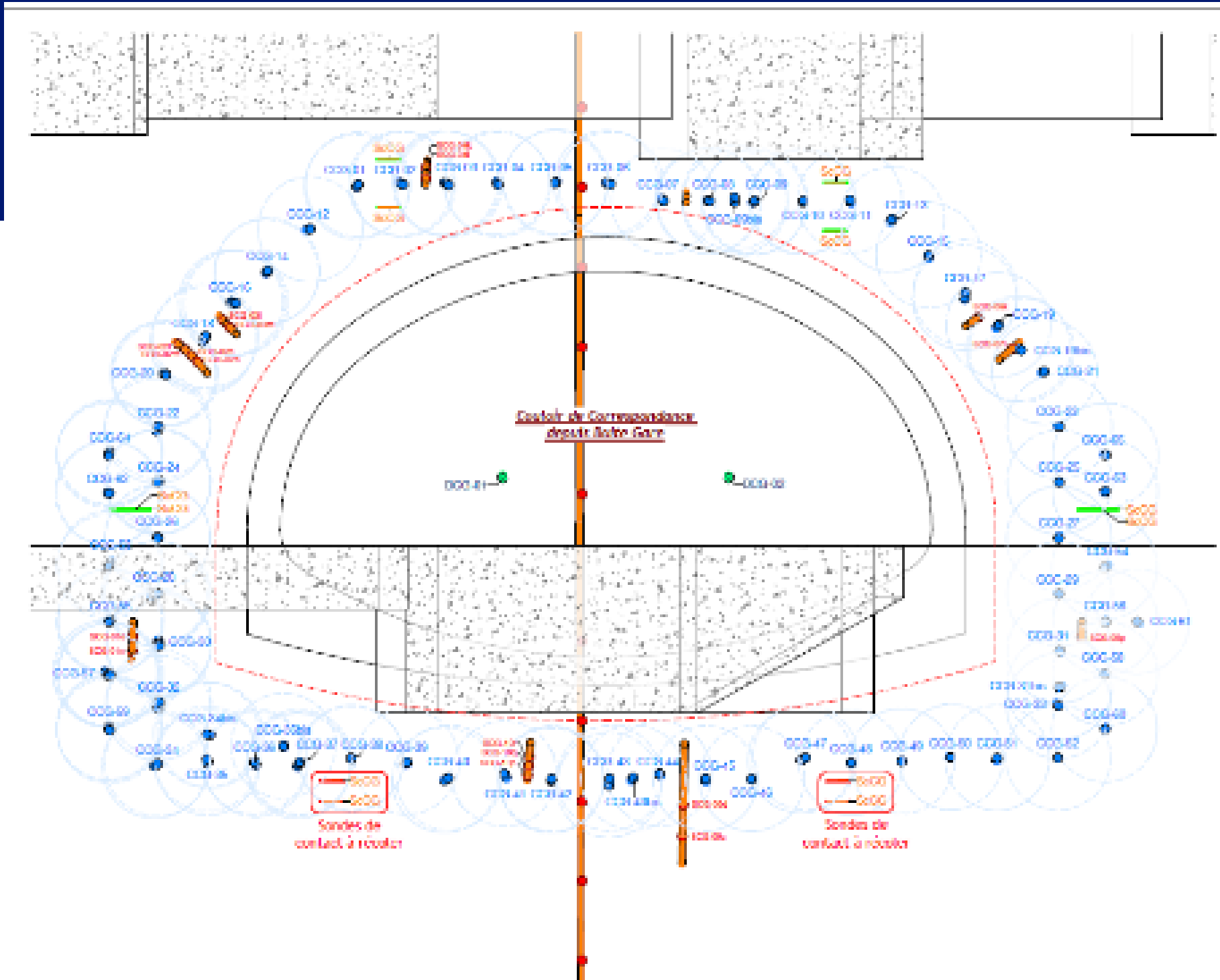
Congélateurs :

- 23 congélateurs horizontaux
- 12 congélateurs verticaux

Sondes :

- 8 sondes de contact
- 7 sondes horizontale
- 2 sonde verticales

Correspondance : Congélateurs et sondes – Depuis Boite Gare



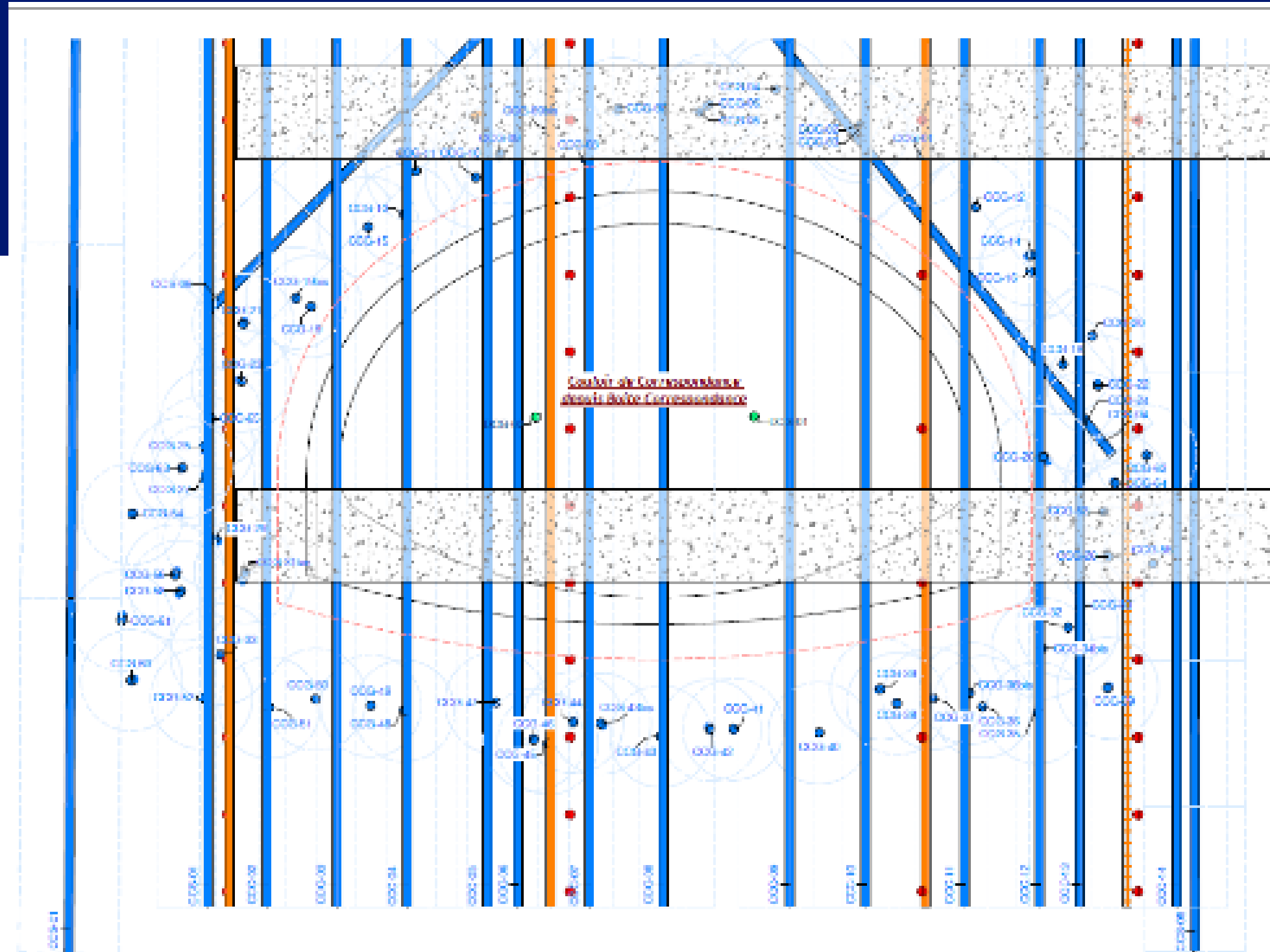
Congélateurs :

- 71 congélateurs horizontaux

Sondes :

- 12 sondes de contact
- 10 sondes horizontales
- 2 sondes inclinées

Congélateurs et sondes – Depuis Boîte Correspondance



Congélateurs :

- 14 congélateurs verticaux
- 4 congélateurs inclinés depuis la surface

Sondes :

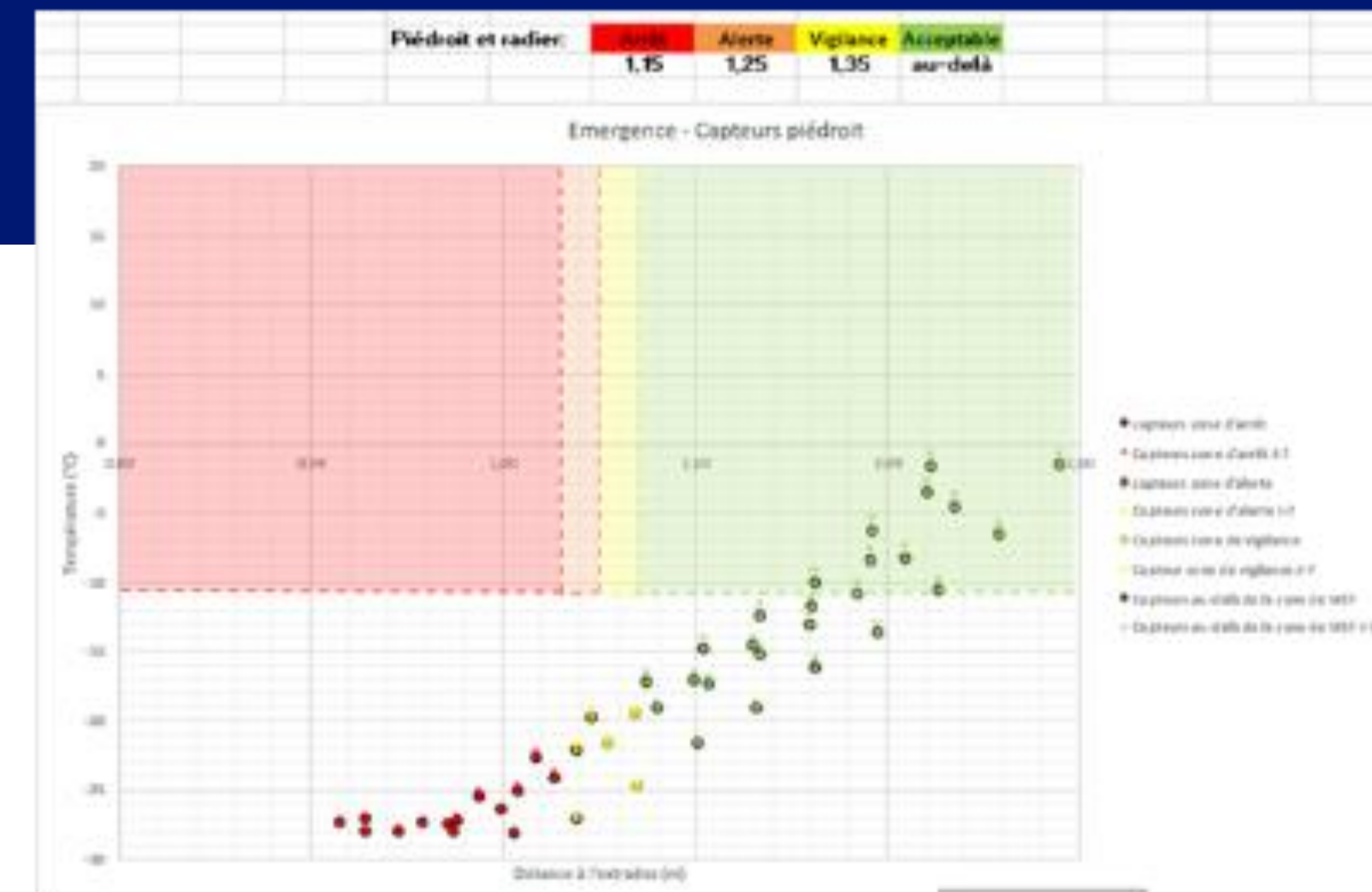
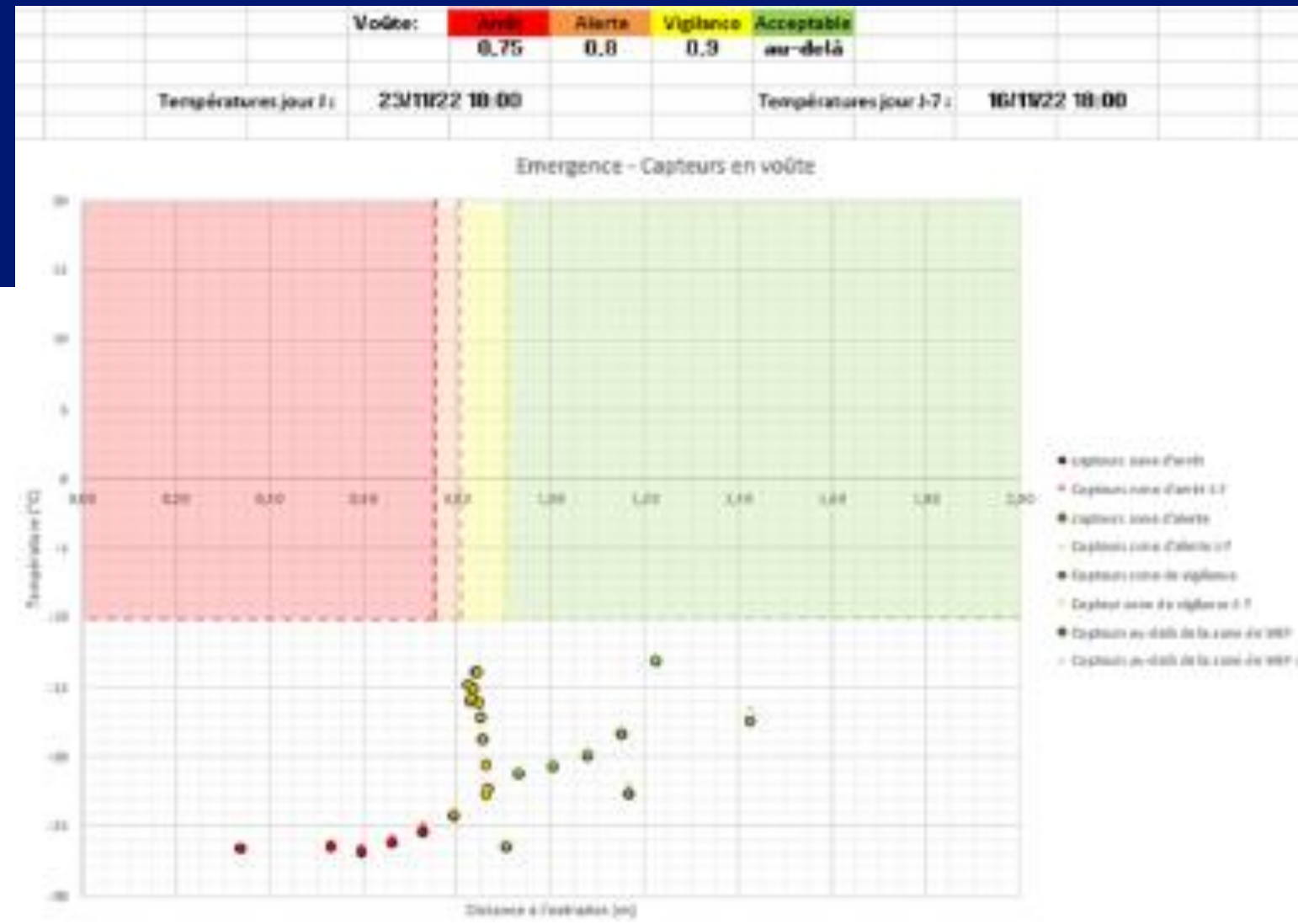
- 9 sondes inclinées depuis la surface
- 4 sonde verticales

Emergence : courbes d'évolution des épaisseurs de glace



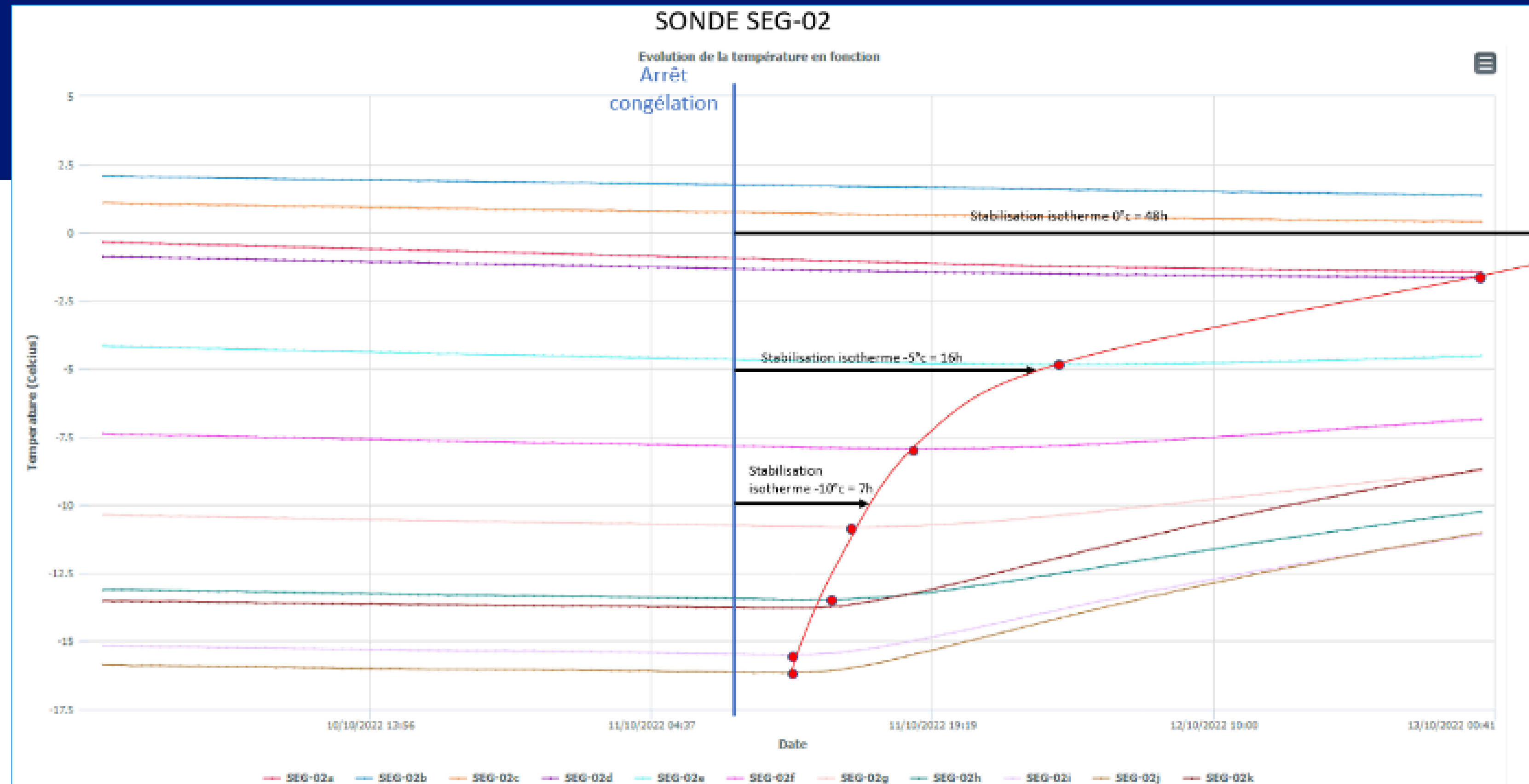
Intermittence
11/10 – 14/10
Fin MEF 25/10

T° en fonction de la distance à l'extrados : Situation au 27/11/2022



REX sur la congélation des sols des chantiers T2A et T3A de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express

Pilotage de la congélation : enseignements de l'intermittence (3 j d'arrêt congélation) sur EME



- Un arrêt de la progression de l'isotherme à -10°C sous 6-8h puis un recul rapide (40-50cm en 3 jours) ;
- Un arrêt de la progression de l'isotherme à -5°C sous 14-16h puis un recul plus lent (env. 15cm en 3 jours) ;
- Un arrêt de la progression de l'isotherme à 0°C sous 48h environ puis un recul très lent ;
- Une perte de la continuité à -10°C entre 48h et 72h ;
- Une perte des critères de collage à -5°C entre 24h et 48h ;
- Conservation de la continuité à 0°C

=> Une réactivité importante de la congélation

Calcul des déformations selon phases travaux → ex du SIAAP

Hypothèses de modélisation :

- **Soulèvement** (phase 1) :
l'épaisseur maximale du sol congelé
a été retenu pour l'ensemble des
isothermes de 0 à -10°C.

- **Tassement 1** (phase 2) :
l'épaisseur minimale pour respecter
les critères de stabilité mécanique et
des déformations seulement pour
l'isotherme à -10°C a été retenue.

- **Tassement 2** (phase 3) :
L'ordre de grandeur généralement à
60% du soulèvement

Phase 1 : Mise en froid
Gonflement du sol
congelé

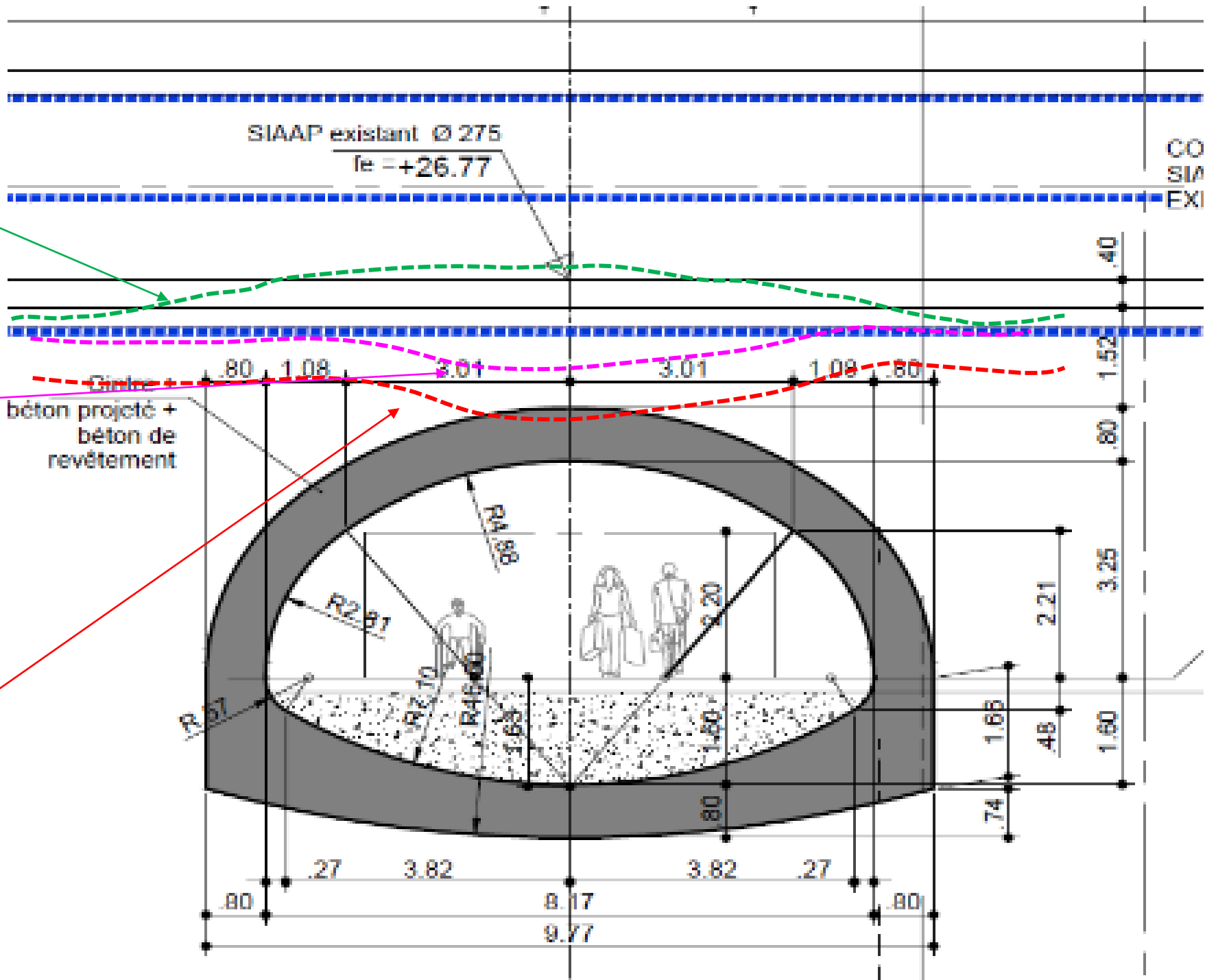
>>>
Risque de soulèvement
du SIAAP

Phase 2 : Entretien du froid =
Excavation conventionnelle

>>>
Risque de tassement 1 du
SIAAP

Phase 3 : Dégel du sol
congelé = Couloir finalisé

>>>
Risque de tassement 2 du
SIAAP



Scénario 1 = gonflement du sol pendant la mise en froid (COR)
=> soulèvement dimensionnant pour le réseau

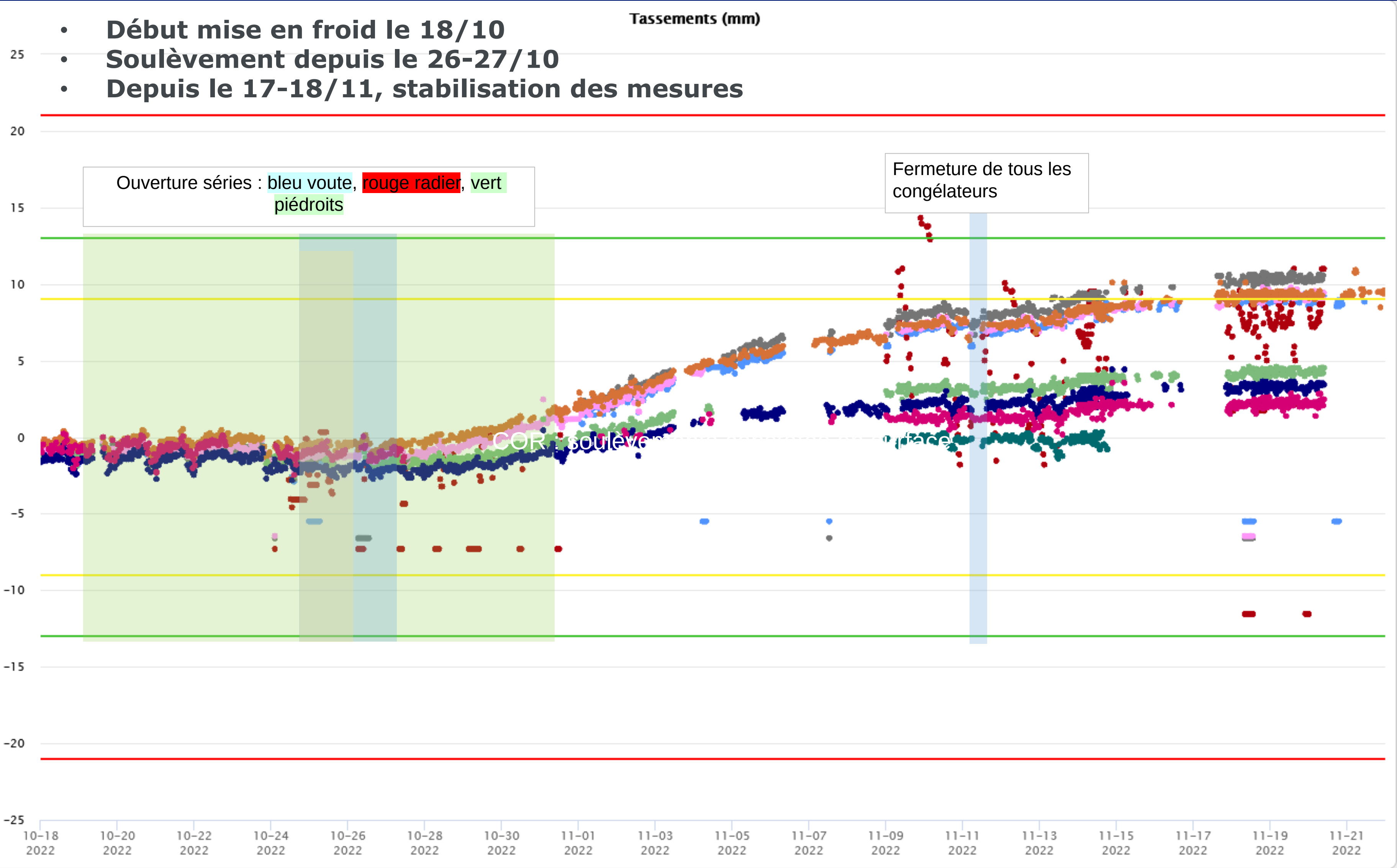
Scénario 2 = pas de gonflement du sol pendant la mise à froid (EME)
=> tassement dimensionnant pour le réseau

	Soulèvement dû au gonflement (mm)	Tassement dû à l'excavation (mm)	Tassement dû au dégel (mm)	Totale
SEVESC	15	-11	-9	Tassement de 5 mm < 25 mm
SIAAP	16	-12	-9	Tassement de 5 mm < 25 mm

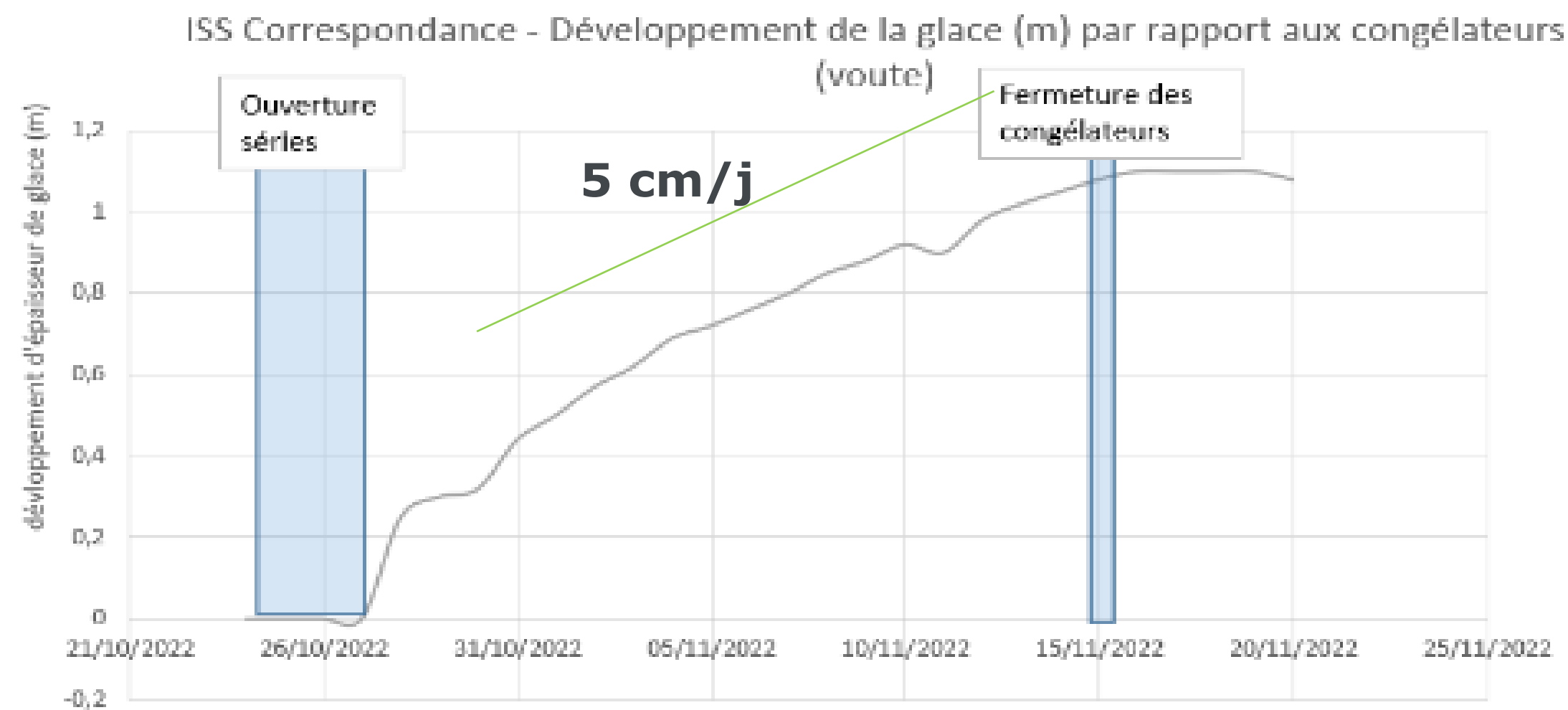
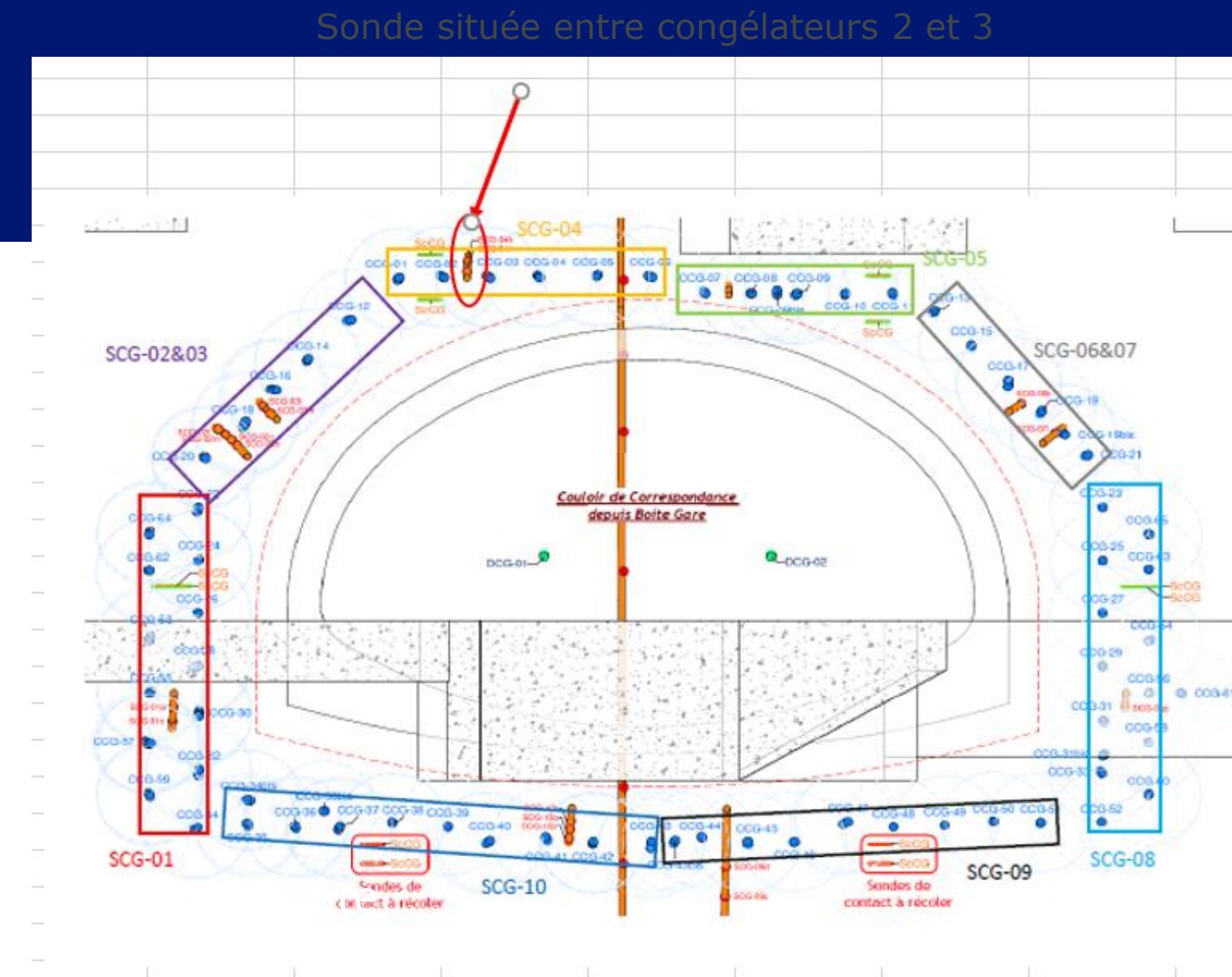
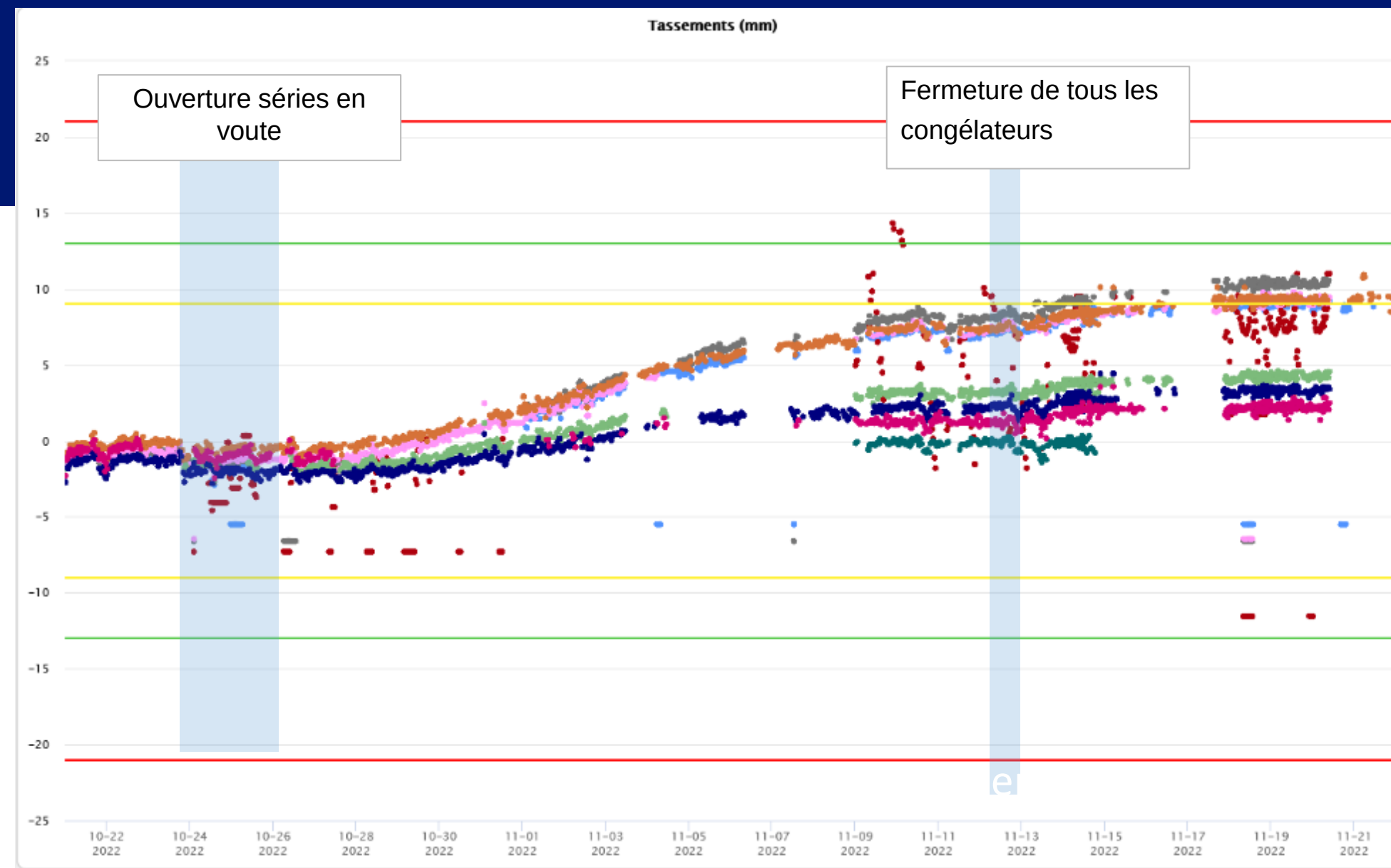
	Tassement cumlé (mm) / seuil (mm)
SEVESC	24 / 25
SIAAP	24 / 25

Gestion des soulèvements dans un environnement sensible

- Début mise en froid le 18/10
- Soulèvement depuis le 26-27/10
- Depuis le 17-18/11, stabilisation des mesures



Soulèvements vs développement de la glace en voûte



Principaux enseignements du déroulement de la congélation

- Un comportement du massif congelé assez proche des calculs, que ce soit en développement de la glace (épaisseur et durée de MEF d'environ 9 semaines pour atteindre les critères requis) ou de déformations associées (notamment le gonflement de la glace).
- Une assez grande réactivité de la congélation liée au type de terrain : AA + Craie (test d'intermittence).
- Une durée assez importante pour congeler la totalité du front (42 m²) => traitement du cœur au gel mou pour apporter de la cohésion et permettre le démarrage des excavations tradi.

