

CONGELATION DES SOLS - PREDICTION ET RETOURS D'EXPERIENCE

FROZEN SOIL – CONCEPTION AND MEASUREMENT

Grégory MEYER¹, Arnaud GUICHARD²

¹ Responsable géotechnique, L15S du Grand Paris Express tronçon T2, SYSTRA, Paris

² Responsable Direction Technique Projet L15S du Grand Paris Express tronçon T2, SYSTRA, Paris

RÉSUMÉ – La congélation des sols devient de nos jours de plus en plus courante et se substitue à d'autres techniques plus classique d'étanchéification ou de renforcement de terrain, parfois en cumulant les deux aspects. En se basant sur le projet du grand Paris de la gare de Vert-de-Maisons et ses 5,1 km de tubes congélateurs s'étirant pour certains sur plus de 70m de long, des calculs prédictifs analytiques et numériques ont été réalisés afin de modéliser en régime transitoire et permanent le comportement du massif congelé.

ABSTRACT – Ground freezing become more and more common and replaces sometimes more traditional ground injections or combining both aspects. Based on the Grand Paris Express project of the Vert-de-Maisons station and its 5.1 km of freezer tubes stretching for some over 70m length, analytical and numerical predictive calculations were carried out in order to model in transient and steady state the behavior of the frozen mass.

1. Introduction

SYSTRA est en charge de la Maîtrise d'Œuvre du tronçon T2 de la ligne 15 Sud du futur réseau métropolitain « Grand Paris Express ». Il s'étendra à horizon 2025 sur une longueur de 21 km (figure 1) de la gare de Villejuif Louis Aragon (gare non comprise) à la gare de Noisy Champs (gare incluse). Entièrement en souterrain, il traverse principalement des zones urbaines denses, et intègre trois passages sous-fluviaux (de la Seine et de la Marne). Il desservira 8 gares du Val-de-Marne (94) en correspondance avec des transports urbains et ferroviaires existants ou en projet, dont la gare du Vert-de-Maisons (dite VDM), reliée au RER D et à long terme au Transilien ligne R. Cette gare fait partie du lot T2A, le plus à l'Ouest du tronçon T2, notifié le 01 février 2017 au groupement HORIZON (Bouygues TP mandataire, accompagné par Soletanche Bachy France, Soletanche Bachy Tunnels, BESSAC et la SADE).

La gare du Vert de Maisons se situe sur la commune de Maisons-Alfort dans le département du Val-de-Marne (94). Elle est implantée à l'ouest de la rue Jean Jaurès (RD6) et à l'est de l'actuelle station de RER D et du faisceau ferroviaire reliant Paris Gare de Lyon à Marseille-Saint-Charles.

Le square Dufourmantelle, constitué de bâtiments de logements collectifs, est inscrit à l'inventaire des Monuments Historiques. Il est situé sur l'emprise de la gare, ce qui impose la réalisation d'une boîte réduite pour les terrassements à ciel ouvert. Cette enceinte, approximativement carrée (45 m x 45 m), ne permet pas la réalisation de quais fonctionnels (trop courts pour des rames de 108 m de longueur). La nécessité de réaliser une partie de la gare en souterrain, dite « caverne », sous les bâtiments Dufourmantelle s'est donc imposée très tôt dans les études de conception. Les dimensions de cette caverne (69,5 m x 15,2 m avec deux couloirs latéraux complémentaires de 5 m de largeur de part et d'autre de la section voutée principale) rendent complexes les travaux d'excavation en méthode conventionnelle.

La présence de terrains certes de bonne qualité (Marnes et Caillasses et Calcaire Grossier) mais baignés par une nappe, ont nécessité des travaux d'injection d'étanchement afin de diminuer les débits d'exhaure au sein de la caverne et permettre en partie de sécuriser le creusement de la partie souterraine de la gare. La présence des Sables de Beauchamp sus-jacents, plus déformables, sous nappe et qui tangentent la voûte de la caverne, nécessite des travaux de congélation, car ces sols relativement fins sont difficilement injectables mais présentent un risque de débouillage (Figure 1).

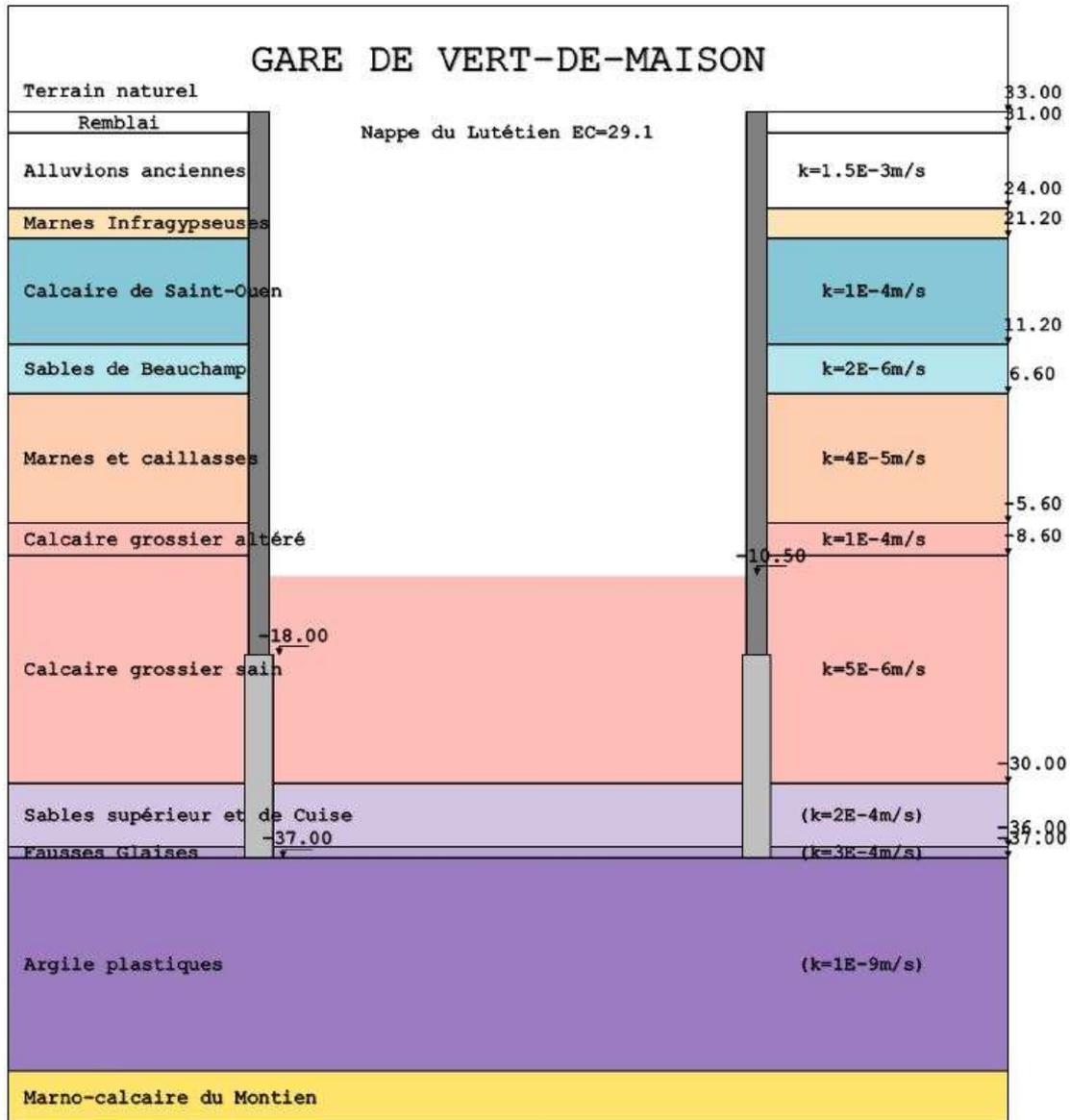


Figure 1 : Coupe géotechnique de la gare de VDM

2. Description du système de congélation

Selon les critères du guide GT8R2F1 de l'AFTES (2006), l'utilisation de coulis spécifiques type micro-ciments sont nécessaires pour injecter les Sables de Beauchamp locaux, mais le résultat peut s'avérer incertain. Ce constat part de la nature même de ces sables, dont l'appellation est trompeuse, notamment au Sud-Est de Paris. Cette formation du Bartonien est constituée d'une superposition de niveaux sableux fins gris vert (parfois grésifié) et de niveaux plus ou moins argileux, voire marneux, sur une épaisseur totale comprise entre 5 et 8m. La distinction relativement classique de deux voire trois faciès dans cette couche, à

savoir un niveau supérieur et inférieur séparés par un niveau médian, n'a jamais été retrouvée dans le secteur d'étude.

Ainsi, les essais en laboratoire ont mis en évidence un faciès plutôt de sol fin, avec un passant moyen de 81% à 80 μm , 19% à 2 μm et une V_{BS} de 1,9 pour un I_P de 15. La visualisation réelle de cette formation, lors des terrassements d'ouvrages les traversant, a confirmé ce caractère particulier des Sables de Beauchamp (Figure 2), en lien avec ses caractéristiques mécaniques relativement correctes ($E_M = 25 \text{ MPa}$, $p_i^* = 2,8 \text{ MPa}$ et $R_c = 0,9 \text{ MPa}$).



Figure 2 : Front de taille dans les Sables de Beauchamp lors des terrassements

Dès lors, la conception de la gare proposait une excavation souterrain à l'abri d'une coque de terrain traité par jet grouting, finalement modifiée en phase d'exécution en congélation. Le système de congélation se compose de tubes congélateurs, mis en série pour certains en fonction de leur linéaire (limité à 100 m), qui sont refroidis par un fluide en circulation à basse température (ici en l'occurrence de la saumure à -30°C , qui est constituée d'une solution aqueuse de chlorure de calcium CaCl_2). Le dispositif se décompose en une partie linéaire de 70 m de longueur, appelé « dalle congelée » (au centre de la Figure 3), et qui permet de sécuriser l'excavation sous-jacente vis-à-vis des risques de débouffage, excavation située sous 2m de hauteur de garde dans les Marnes et Caillasses. Cette dalle congelée a donc un objectif purement hydraulique, et la température de congélation visée à cœur du massif est de -5°C , par le biais de 36 congélateurs espacés d'environ 1 m sur deux lits (et un linéaire total d'environ 2 690 m). Un deuxième dispositif complémentaire permet, dans un second temps, de congeler les couloirs mezzanines, qui seront à terme les futurs escaliers mécaniques d'accès aux quais de la gare. Cette seconde installation est donc inclinée pour suivre le génie civil de ces couloirs. Ces couloirs traversant intégralement les Sables de Beauchamp, la congélation joue alors un rôle mécanique et la température objectif descend à -10°C (et un linéaire total d'environ 2 830 m).

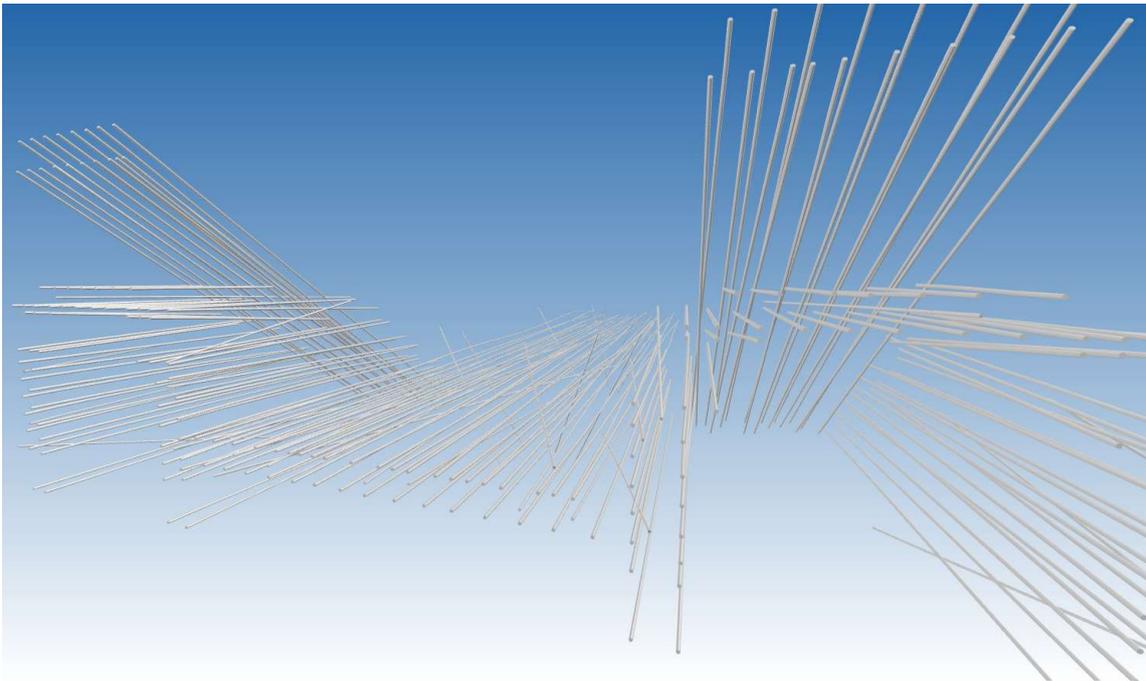


Figure 3 : Vue 3D du dispositif de congélation

Les tubes congélateurs sont composés de deux tubes coaxiaux en inox, entre lesquels circule le fluide refroidissement. Ces tubes ont été insérés dans un forage à l'abri d'un tube perdu de 114 mm de diamètre extérieur (Figure 4). L'intégralité des forages a été récolé dans les trois dimensions sur toute leur longueur afin de connaître précisément leurs déviations et ajouter des forages de congélation si nécessaire. Le choix d'un matériau en inox a été décidé au cas où un changement de fluide plus frigorigène devrait être envisagé à un moment donné du projet (azote liquide injecté à -196°C). Il s'agit d'un choix sécurisation de la congélation et non d'une nécessité selon le dimensionnement du dispositif, puisque la durée de la mise en froid de 30 jours était admissible dans le planning général des travaux.

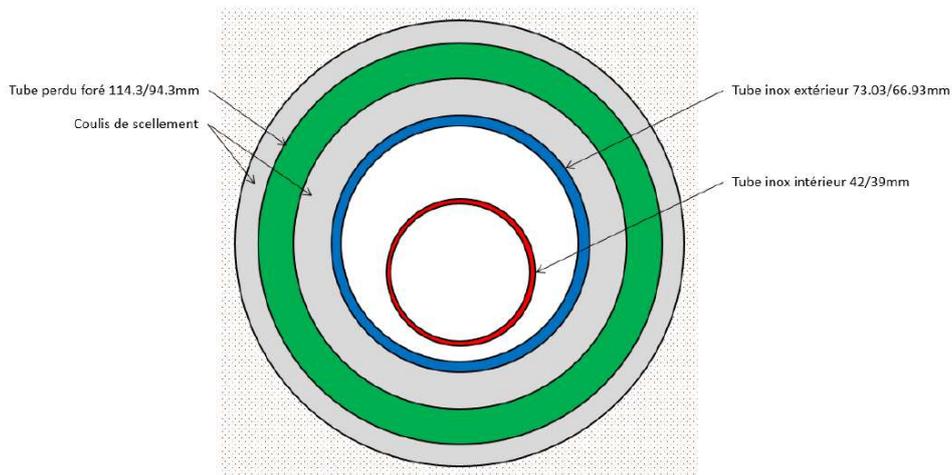


Figure 4 : Dispositif des tubes de congélation

De nombreux essais en laboratoire ont été réalisés sur des échantillons carottés dans les Sables de Beauchamp. Ceux-ci ont consisté à réaliser des essais mesures de résistances à la compression, détermination des paramètres de cisaillement et des modules de déformations, pour des éprouvettes « intactes », sous congélation (à -5°C , -10°C et -20°C) et après dégel. Ces essais sont indispensables pour déterminer le comportement

mécanique du massif gelé, tout comme les essais de minéralogie qui ont permis d'en déduire la conductivité thermique du sol. Enfin, des essais de gonflement et de porosité des sols ont été réalisés afin d'estimer les soulèvements liés d'une part au changement de phase (de l'ordre de 1 à 4% du volume gelé) et d'autre part au potentiel de ségrégation en lien avec la succion cryogénique.

Pour contrôler le design de cet imposant système, des thermocouples, c'est-à-dire des capteurs de températures, sont installés tous les 40 cm à 2 m dans des forages spécifiques, interceptant de biais les zones congelées afin de déterminer les épaisseurs réellement congelées (pour un objectif de 1,6 m pour les couloirs mezzanines et 2 m pour la dalle). Ces thermocouples ont une sensibilité de +/- 0,5°C et sont suivis automatiquement sur une plateforme dédiée. Afin d'alimenter en froid l'intégralité du circuit (volume de 50 m³), 1 bac de saumure de 9 m³ est installé en surface, refroidis par un ensemble de 7 groupes froids de 157 kW chacun (soit 1 100 kW au total) à -30°C. Cette installation permettra de développer une puissance totale théorique de 618 kW lors de la mise en froid du système à cette même température, écrêtée sur les 5 premiers jours afin de ne pas surdimensionner le système. Cette puissance chutera à 250 kW pendant la phase d'entretien de la congélation et le creusement de la caverne souterraine.

Le suivi et l'enregistrement de la puissance délivrée permet de comparer la puissance théorique à la puissance réellement développée, par mètre linéaire de tubes congélateurs (Figure 5). Une constatation immédiate est que la moitié de la puissance fournie par les groupes froids (650 kW au total) est consommée en dehors de la zone congelée (dans les conduites et dans la gare), sans pour autant pouvoir diminuer cette puissance au risque de ne pas mettre en froid suffisamment rapidement le sol. L'autre moitié de la puissance développée, celle entrant directement dans les tubes congélateurs forés dans le sol, est de l'ordre de la moitié de celle estimée par le calcul sur les premiers jours de mise en froid. Sur la deuxième moitié de la mise en froid, les puissances semblent rejoindre les valeurs théoriques. Une des raisons de cet écart est lié à la différence entre la température du sol réelle (de l'ordre de 16 à 17°C) et la température prise en compte de manière sécuritaire à 25°C dans les calculs, ce qui demande au final moins de puissance pour arriver à la même baisse de température.

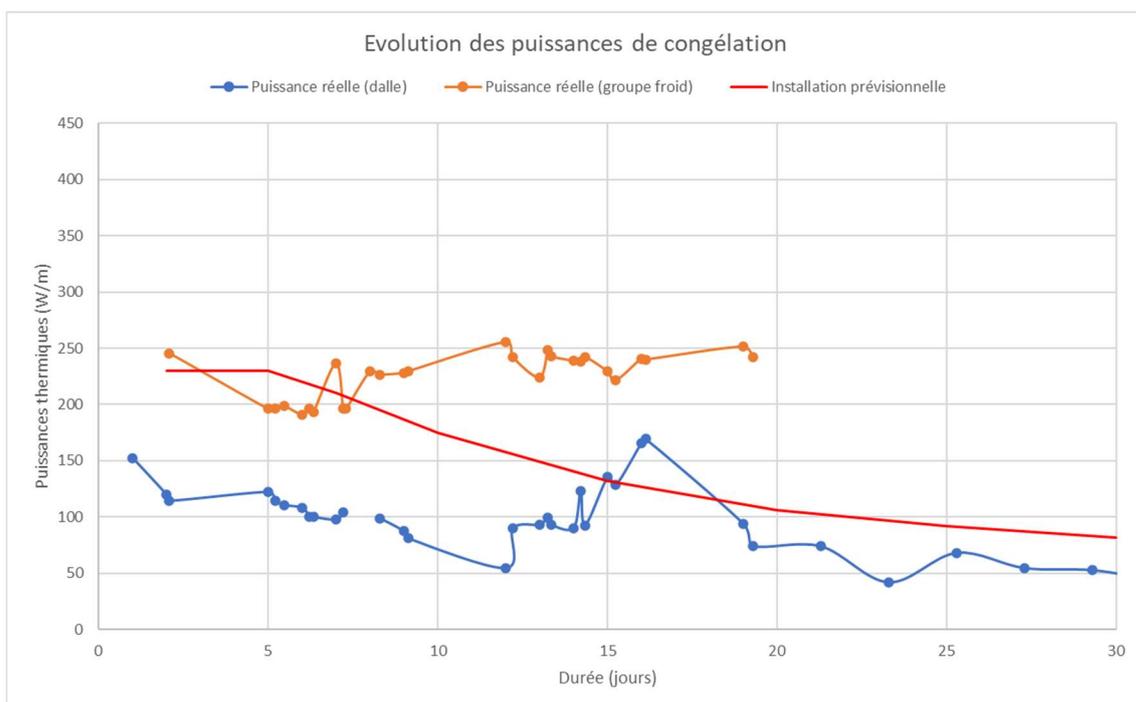


Figure 5 : Evolution des puissances frigorifiques réelles par rapport aux calculs

3. Dispositif des mesures de température

L'ensemble des thermocouples, au nombre de 274, est disposé de manière à déterminer l'épaisseur de glace et la température atteinte à une certaine distance des tubes congélateurs. C'est cette distance qui pilote la sécurisation du système.

Le suivi de l'évolution des températures au cours du temps permet de se rendre compte de l'évolution de l'épaisseur de glace (Figure 6). Les vitesses relatives d'abaissement des températures ne sont pas linéaires. Les températures décroissent rapidement dès les premiers jours de mise en froid et on peut noter un certain ralentissement à l'approche de l'isotherme 0°C. Ensuite, on peut constater une reprise de l'accélération de la baisse des températures, jusqu'à environ 30 jours après le démarrage de la mise en froid.

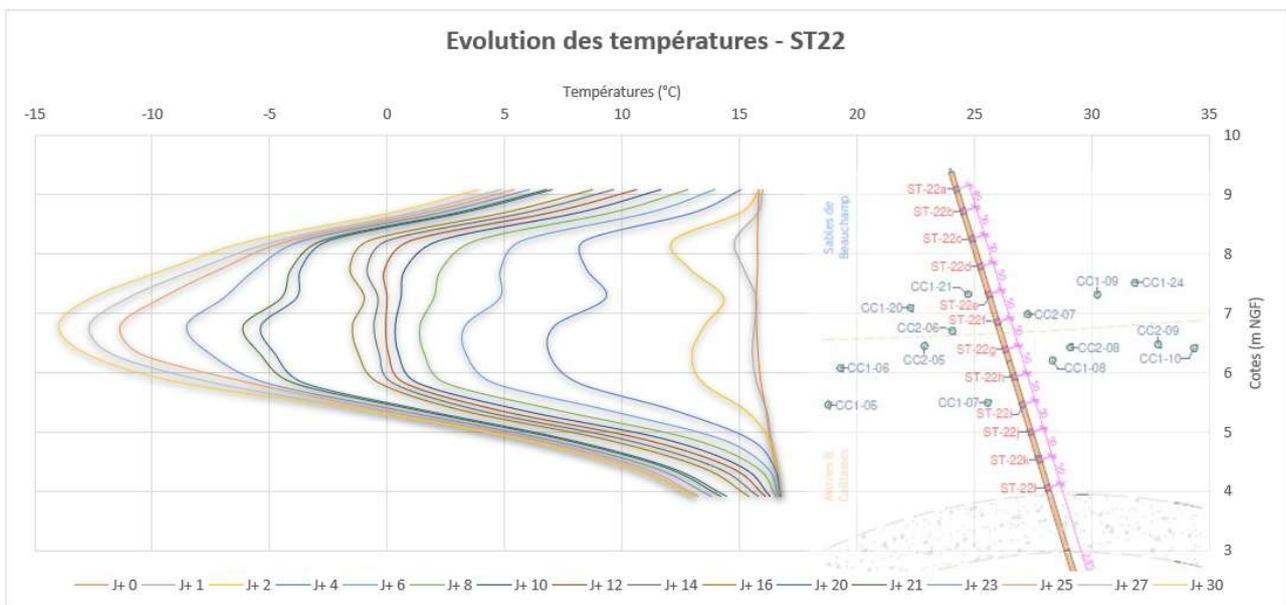


Figure 6 : Evolution des températures sur le chapelet ST22 (appellation ST pour tunnel)

Par contre, il est intéressant de regarder l'épaississement de la glace (à l'isotherme 0°C) au cours du temps (Figure 7). Après une première phase de développement rapide du front de glace, au bout de quelques jours (moins d'une semaine), la progression de la glace semble relativement linéaire, avec une vitesse de croissance de l'ordre de 5 cm/j (en moyenne) pour l'isotherme 0°C, environ 4 cm/j pour l'isotherme -5°C et environ 3 cm/j pour l'isotherme -10°C.

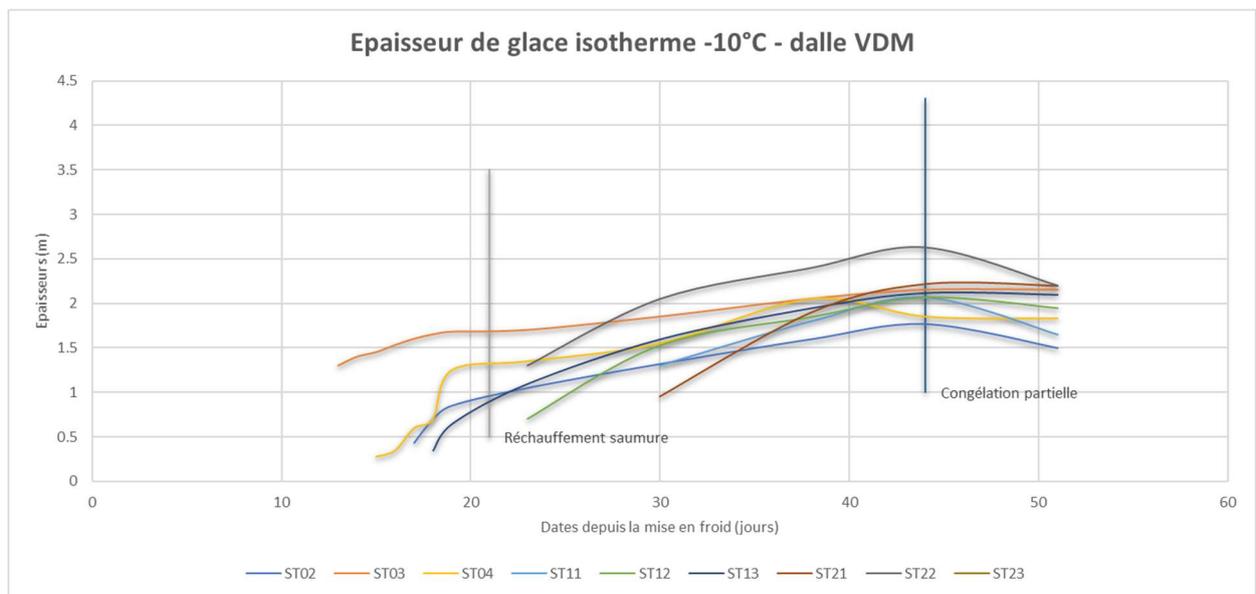
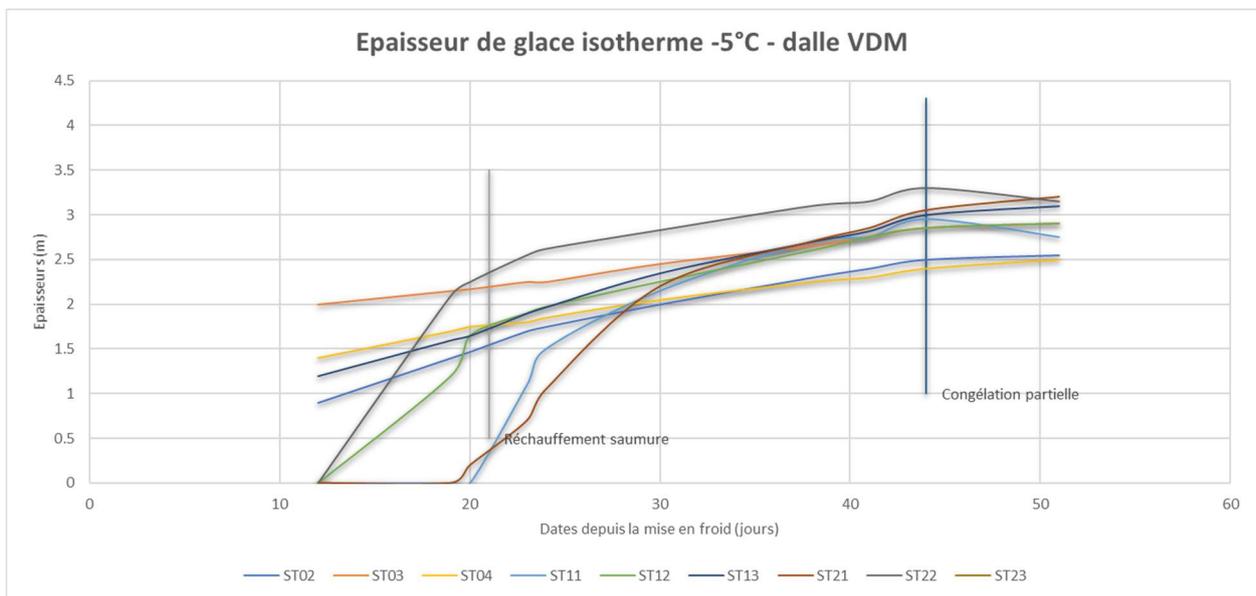
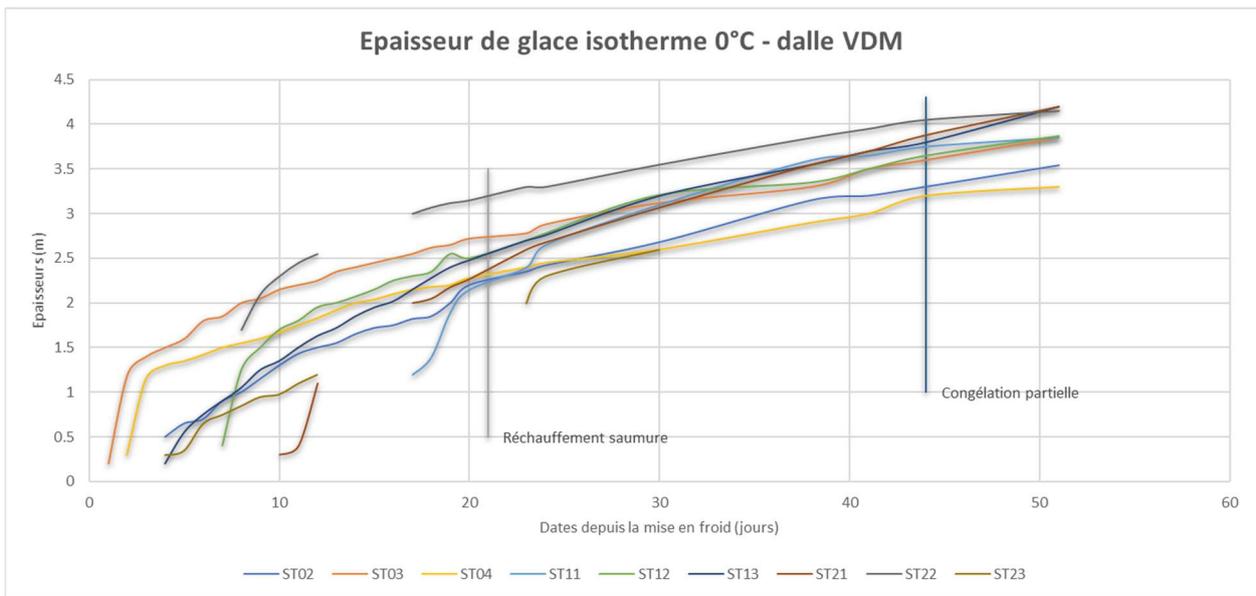


Figure 7 : Augmentation de l'épaisseur de glace au cours du temps

Les épaisseurs finales de développement de la glace sont comprises entre 2,5 et 3,5m au bout des 30 jours de mise en froid, ce qui est en lien avec les soulèvements observés en surface, de l'ordre de 15 à 18 mm. L'augmentation de volume lors du passage en glace est de 9%. A partir d'une porosité de 30% environ dans les Sables de Beauchamp, l'expansion de la dalle congelée serait alors de 2.7%, ce qui peut expliquer les soulèvements observés. Quoi qu'il en soit, les objectifs d'épaisseurs de glace et de développement de la glace au niveau de l'interface des Sables de Beauchamp et des Marnes et Caillasses ont bien été atteints et ont permis de démarrer le creusement en toute sécurité.

La coupure de 15 tubes congélateurs en partie supérieure du système (appelée congélation partielle sur la Figure 7) montre quelques jours après l'arrêt de l'alimentation en saumure une absence de réaction sur l'isotherme 0°C, un ralentissement dans la progression de l'isotherme -5°C et un recul de l'isotherme -10°C.

4. Extrapolation des mesures de température

La position des thermocouples ne peut se situer à la position exacte de l'interface entre les Sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses ou à la distance nécessaire au pilotage des travaux. Il est donc nécessaire de pouvoir extrapoler les mesures à n'importe quelle distance des tubes congélateurs. La première méthode, la plus usuelle, est celle développée par Sanger&Sayles (1979) :

$$T(r) = T_0 - (T_0 - T_{tube}) \frac{\ln\left(\frac{R_0}{r}\right)}{\ln\left(\frac{R_0}{r_{tube}}\right)} \quad (1)$$

La température à une distance r du tube congélateur dépend donc de la température mesurée sur le thermocouple T_0 et la distance R_0 entre le tube congélateur et le thermocouple, la température du fluide circulant dans le tube congélateur T_{tube} , et le diamètre du tube congélateur r_{tube} . Cette formule (1) permet rapidement de déterminer une répartition unidimensionnelle des isothermes à partir des tubes congélateurs, que l'on peut recréer dans un modèle thermique aux éléments finis (Figure 8 gauche), à partir d'une conductivité thermique du sol issue d'essais d'identifications en laboratoire, à 2W/mK. On peut clairement voir que cette méthode ne correspond pas à la réalité de répartition des températures (Figure 8 droite), pour une même échelle de couleur étalant les valeurs de -35°C (température injectée dans les tubes congélateurs) à +20°C.

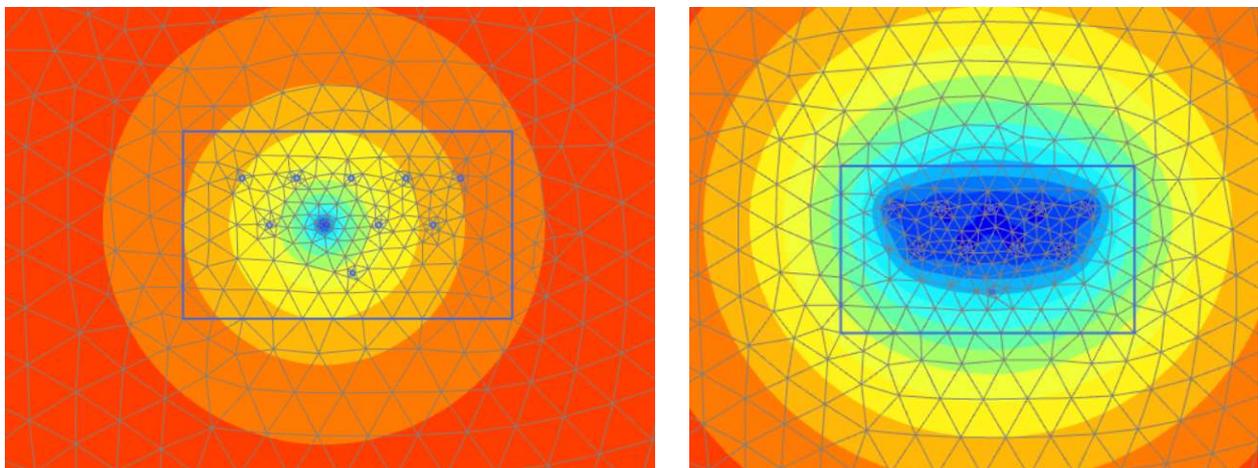


Figure 8 : Comparaison des températures entre un tube congélateur unique et un ensemble de tubes congélateurs (coupe verticale de la dalle)

Il est donc préférable d'extrapoler les températures selon la formule (2) de Hu (2010), qui prend en compte une répartition spatiale des températures en plan. Elle dépend de la température de circulation du fluide dans les tubes congélateurs (t_c), de leur rayon (r_0), d'une distance ξ de front de gel et de facteurs géométriques suivant la répartition régulière ou en quinconce des tubes congélateurs (Figure 9).

$$t(x, y) = \frac{t_c}{\ln\left(\frac{l}{2\pi r_0}\right) + \frac{2\pi\xi}{l}} \left\{ \frac{\pi(2\xi + L)}{l} - \frac{1}{2} \ln \left\{ 4 \left[\operatorname{ch}\left(\frac{2\pi}{l}\left(\frac{L}{2} - y\right)\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{l}x\right) \right] \left[\operatorname{ch}\left(\frac{2\pi}{l}\left(\frac{L}{2} + y\right)\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{l}x\right) \right] \right\} \right\} \quad (2)$$

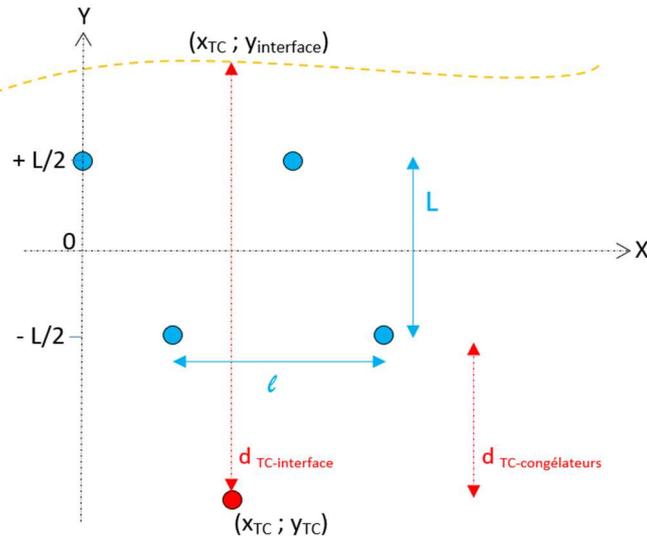


Figure 9 : Définition des paramètres géométriques de Hu

Malgré sa formulation relativement complexe en premier abord, cette méthode permet de mieux appréhender les températures au sein du massif, une fois le paramètre ξ fixé par un calage à partir des températures mesurées sur le thermocouple à une position (x, y) dans le massif). En prenant un exemple sur la ligne de thermocouples ST04-x et un calage du paramètre ξ depuis le thermocouple SC04-f le plus proche, l'extrapolation des températures selon Sanger&Sayles et Hu est fourni en Figure 10. Il est facilement identifiable que la méthode de Sanger&Sayles dans le cas de ce chantier n'est pas propice à une extrapolation des mesures en dehors du massif congelé (l'amplitude et la position des isothermes n'étant pas cohérentes avec les mesures *in situ*). Alors que la méthode de Hu fournit des résultats beaucoup plus exploitables, hormis bien entendu dans la zone des tubes congélateurs (courbe en pointillés).

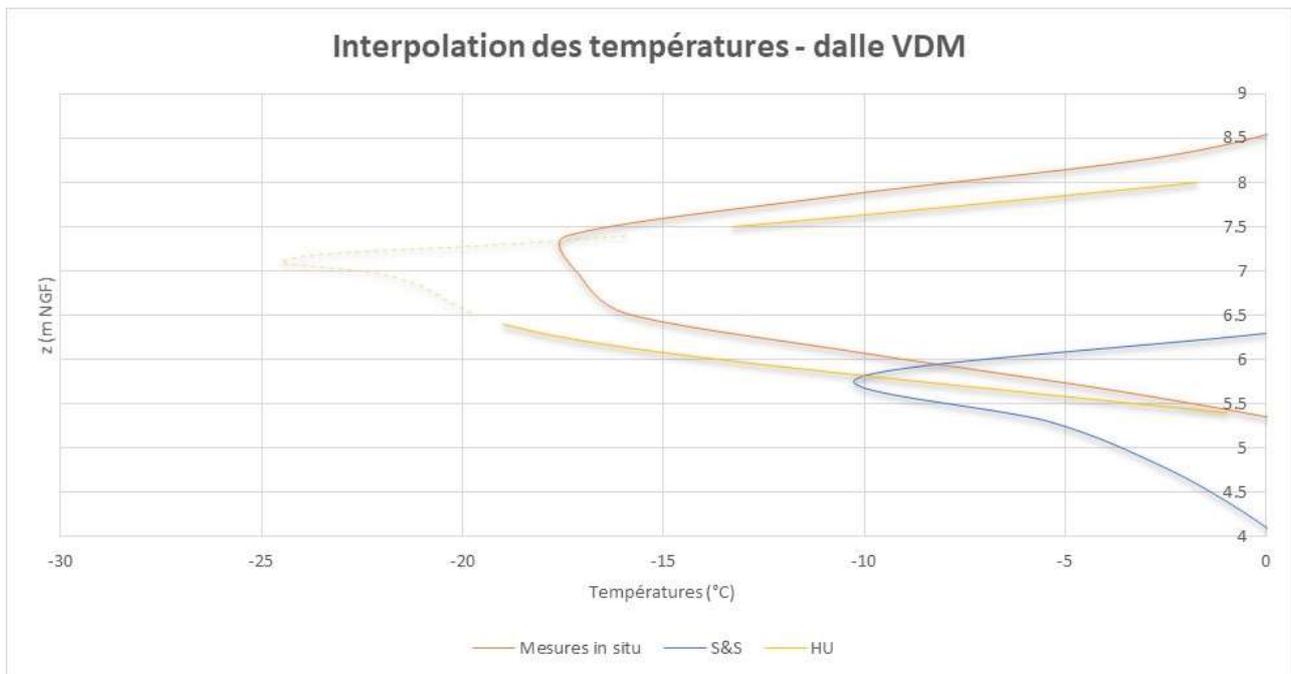


Figure 10 : Interpolation des mesures par différentes méthodes

5. Conclusions

Les travaux de congélation de la gare de Vert-de-Maisons ont débuté en fin d'année 2021 et montrent déjà des résultats satisfaisants et très instructifs. Le suivi quasiment en temps réel de ces travaux est primordial pour apprécier le développement de la glace sur les premiers jours. Un des enjeux majeurs du pilotage d'un chantier de congélation est de contrôler à la fois le développement de la glace pour assurer les travaux en toute sécurité et limiter les soulèvements des bâtiments en surface afin de ne pas les endommager. Pour ce faire, il est fondamental de définir préalablement et collégialement (entreprise et Maître d'Œuvre) les conditions de suivi des différents critères de congélation (température, épaisseur des isothermes, etc.) et les seuils de pilotage à partir desquels des actions doivent être menées.

Par la suite, si les seuils sont approchés, diverses adaptations de la méthode s'offrent aux entreprises, comme le réchauffement de la saumure ou encore la fermeture de certains tubes congélateurs. Le retour d'expérience de ces travaux a permis de montrer, dans le cas présent, que la méthode d'extrapolation de Hu est plus réaliste que la méthode classique de Sanger&Sayles.

6. Bibliographie

GT8R2F1, La conception et la réalisation des travaux d'injection des sols et des roches, recommandations de l'AFTES, Tunnel et Ouvrages Souterrains n°194-195, mars-juin 2006

Sanger F.J., Sayles F.H, Thermal and Rheological computations for artificially frozen ground construction, Engineering Geology 13, 311-379, 1979

Hu X., Average Temperature Model of DoubleRowPipe Frozen Soil Wall by Equivalent Trapezoid Method, AIP Conference Proceeding, 2010