

PUITS D'ESSAIS A AULNAY SOUS BOIS – METRO L16 : ETANCHEMENT DES SOLS POUR LE CREUSEMENT DE GALERIE

TEST SHAFT AT AULNAY SOUS BOIS – METRO L16 : SOIL « WATER SEALING » METHOD FOR TUNNEL EXCAVATION

Pierre-Louis REGAZZONI ¹, Alexandre GIROUX ², Jonathan ROT ³, Basile LECONTE ⁴, Laurent SOYEZ ⁵

¹ *Egis Structures et Environnement, Seyssins, France*

² *Egis Structures et Environnement, Saint Quentin, France*

³ *GEOTEC, Saint Quentin en Yvelines, France*

⁴ *Solétanche Bachy, Rueil Malmaison, France*

⁵ *Société du Grand Paris, Saint-Denis, France*

RÉSUMÉ – Pour le projet de la ligne 16 du Grand Paris, une galerie relie le tunnel principal du métro aux ouvrages de ventilations et de secours. La galerie est excavée en méthode « traditionnelle » sous nappe à la suite d'un étanchement du massif de sol. Un puits d'essai a été construit à Aulnay-sous-bois pour éprouver les méthodes d'étanchement (congélation et jet-grouting) dans la formation des Sables de Beauchamp.

ABSTRACT – For the metro 16-line project of Grand Paris, a tunnel is connecting the railway tunnel to the ventilation and emergency shafts. The plan consists in excavating the tunnel with a “classical” method below the water table. In consequence, the surrounding soil of the tunnel requires being watertight. In order to test the water “sealing” soil method (Artificial soil freezing and jet-grouting) in the Paris geological formation “Sables de Beauchamp”, we built a test shaft at Aulnay-sous-bois.

1 Introduction

Le Grand Paris Express est un projet de construction de 4 lignes de métro automatiques de 200 km de long reliant 68 gares et 7 ouvrages techniques. Implanté en périphérie de la ville de Paris, il permettra de dynamiser le territoire, faciliter les échanges entre les pôles économiques (industriels, recherche, universitaire, culturels, etc.) et relier les trois principaux aéroports parisiens.

Le marché de maîtrise d'œuvre d'infrastructure de la ligne 16 a été confié au groupement EGIS-TRACTEBEL en 2014. Ce tronçon long de 28 km, implanté sur les départements de la Seine Saint-Denis et de la Seine et Marne, permettra à terme de relier 9 gares et 36 ouvrages.

Certains ouvrages (comme les ouvrages de ventilation et de secours) ne sont pas forcément positionnés au droit du tracé du métro. Cet excentrement par rapport au tracé du métro de l'ouvrage annexe requiert d'assurer la jonction avec le tunnel par des galeries appelées rameaux.

Il est prévu de construire ces galeries de manière dite « traditionnelle ». Ces rameaux étant excavés sous nappe, un étanchement du massif est requis. Pour éprouver les méthodes d'étanchement et plus particulièrement de la formation des Sables de Beauchamp, un puits d'essais a été réalisé à Aulnay-sous-Bois dans l'emprise de la future gare.

2 Environnement du puits d'essais et travaux prévus pour le puits d'essai

2.1 Contexte géologique et hydrogéologique Ligne 16

La ligne 16 se développe principalement dans les formations de l'Eocène du bassin sédimentaire parisien : Masses et Marnes de gypse, (MPH), Calcaire de Saint Ouen (SO), Sables de Beauchamp, Marnes et Caillasses (MC) et Calcaire grossier (CG). Le terrain est baigné par les nappes du Bartonien et du Lutécien dont les niveaux sont proches de la surface.

La formation des Sables de Beauchamp est la plus concernée par les tunnels de la ligne 16. Par conséquent, il en est de même pour les rameaux. L'épaisseur de la formation est généralement comprise entre 10 et 15 m. Les identifications disponibles mettent en évidence un matériau de type sable propre à argile sableuse, très hétérogène dans ses caractéristiques physiques, de couleur gris-vert bleuté. La perméabilité de cette formation est très variable (pour la conception, la gamme de perméabilité horizontale retenue varie de 9×10^{-4} à 1×10^{-8} m/s sur la ligne 16).

2.2 Méthode et technique de traitement du sol

La réalisation des rameaux sous nappes dans les Sables de Beauchamp est un enjeu pour le projet. Dans le cas d'une étanchéité non maîtrisée, le risque associé est une apparition subite de venues d'eau de débit plus ou moins important avec un entrainement des particules fines du sol. Ce phénomène est communément appelé « débouillage ».

Les caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques de la formation des Sables de Beauchamp rendent pratiquement difficile le traitement par imprégnation.

La recherche de la maîtrise des coûts et des aléas requiert une solution technique plus robuste. Des retours d'expérience en région parisienne ont montré que le jet-grouting et la congélation constituent des alternatives possibles.

2.3 Description de l'ouvrage

Le puits d'essai est localisé dans l'emprise de la future gare d'Aulnay-sous-Bois. Il se compose d'une paroi moulée circulaire de 80 cm d'épaisseur délimitant un diamètre intérieur de 7,5 m pour une profondeur de 25 m. A partir du fond de fouille remblayé, soit à 21 m de profondeur, deux galeries de 3 m de diamètre et de 5 m de longueur (cf.) ont été creusées. Le massif de la première galerie était préalablement étanché par du jet-grouting et le massif de la seconde galerie par congélation.

En plus d'éprouver les méthodes (jet-grouting et congélation) d'une manière qualitative, l'un des objectifs du puits d'essais est d'apprécier quantitativement l'amélioration des terrains. Pour cela, une investigation géotechnique poussée du comportement hydraulique, mécanique et thermique entre l'état initial et l'état traité des Sables de Beauchamp a été effectuée. Le massif de sol faisant l'objet du creusement de la galerie a été instrumenté.

Les reconnaissances et essais ont eu pour objectifs l'identification précise par carottage continu des Sables de Beauchamp à l'état naturel, une caractérisation du comportement mécanique (au laboratoire et à l'échelle de l'ouvrage) et du comportement thermodynamique (cf. Figure 1 et Tableau 1).

Le prélèvement des échantillons pour le laboratoire a été fait par carottage. Le puits et les galeries ont aussi été instrumentés pour un suivi précis des déplacements de certains points caractéristiques (cf. Tableau 2).

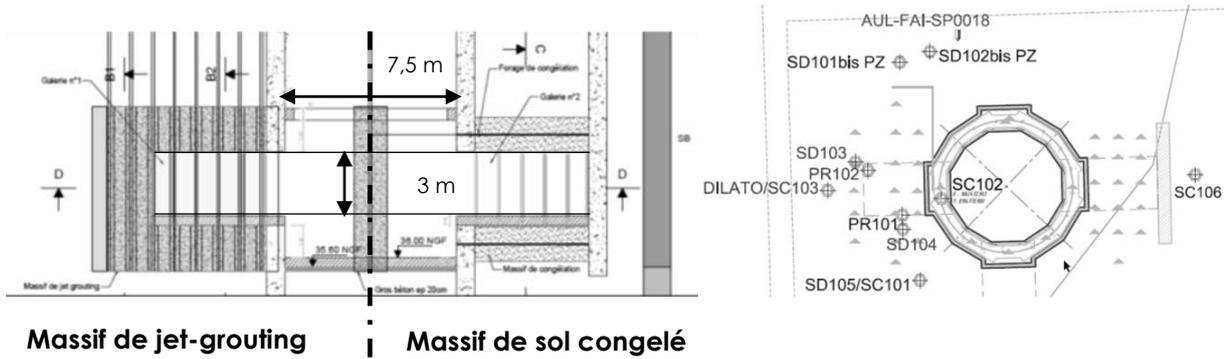


Figure 1 : Coupe du puits d'essai (à gauche) et plan des reconnaissances et investigations géotechniques réalisées sur le puits d'essais (à droite).

Tableau 1 : Les reconnaissances et les essais mécaniques réalisés sur le puits d'essais d'Aulnay

| Type | Sol naturel | Jet- grouting | Sol congelé | Objet |
|-----------------------|-------------|---------------|-------------|--------------------------------|
| Carotté (SC) | 1 | 2 | 1 | Prélèvement |
| Cross hole (CH) | 1 | 1 | - | Modules de déformation |
| Pressiomètre (PR) | 1 | 1 | - | |
| Dilatometre (DILATO) | - | 1 | - | Pression limite |
| Essai à la plaque | - | 3 | - | Déformabilité massif |
| Vérin plat | - | 3 | 3 | |
| Essais en laboratoire | oui | Oui | oui | Identification et comportement |

Tableau 2 : L'instrumentation sur le puits d'essais

| Type | Paroi moulée | Jet-grouting | Sol congelé | Objet |
|------------------------------------|--------------|--------------|-------------|-----------------------|
| Piézomètre (PZ) | 2 | - | | Niveau d'eau |
| Inclinomètre vertical (déformètre) | 3 | 3 | 3 | Déformation du massif |
| Inclinomètre horizontal | - | 1 | 1 | |
| Mesures de convergence | 12 | 12 | 12 | Déplacement galerie |
| Nivellement de surface | 4 | 16 | 16 | Déplacement surface |
| Extrusomètre | - | 1 | 1 | Déformation du massif |
| Corde vibrante | - | 10 | 10 | |

3 Principaux résultats du puits d'essais

3.1 Résultats et analyse des essais et mesures sur sites

3.1.1 Galerie traitée par congélation

Les résultats des essais de résistance à la compression uniaxiale ont confirmé l'augmentation significative de résistance des sols gelés en lien avec la formation de glace dans la matrice du sol.

La figure ci-dessous présente les résultats des essais menés. A degré de saturation constant la résistance est d'autant plus forte que la température de congélation est faible. Pour une température donnée, la résistance augmente avec le degré de saturation du sol.

Des éprouvettes confectionnées en laboratoire ont été soumises à différents paliers de chargement lors de leur congélation pour mesurer le taux de gonflement lié au gel. Les mesures ont permis d'évaluer la sensibilité des Sables de Beauchamp en se basant sur la notion de potentiel de ségrégation (sensibilité du sol à la formation de lentille de glace) développé par Konrad et Morgenstern en 1981. Les résultats ont conclu à un taux de gonflement lié au gel de l'ordre de 0,35% et un faible potentiel de ségrégation.

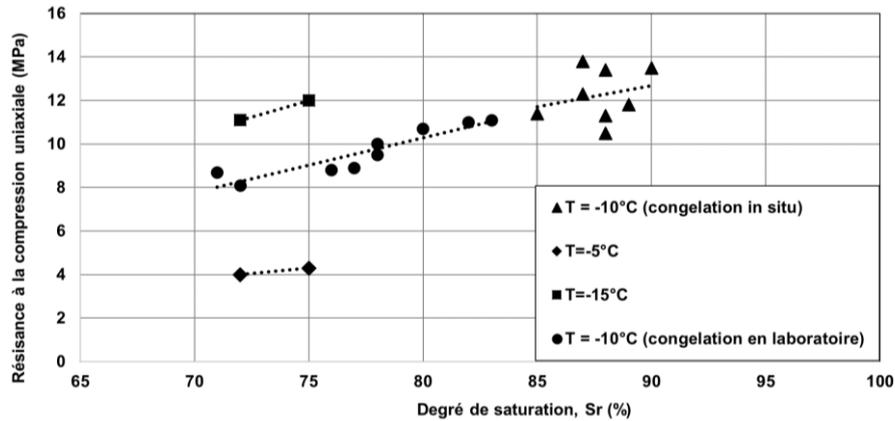


Figure 2 : Résistance à la compression en fonction de la température et du degré de saturation

D'autre part, une particularité des sols gelés est de voir leurs caractéristiques mécaniques évoluer avec le temps sous charge constante. Une série d'essais de fluage sous contrainte uni-axiale et triaxiale a été menée sur des échantillons congelés à différentes températures. Ces essais ont conclu à une faible sensibilité des Sables de Beauchamp à ce phénomène avec une réduction de l'ordre de 10% de la résistance et une réduction du module d'élasticité apparent de 5% pour une durée de chargement de 3 mois.

Les différents type d'essais réalisés sur sols gelés in-situ ou en laboratoire ont fourni des résultats similaires. Cependant, les résistances à la compression sur sols gelés en laboratoire montrent des résistances moins élevées que sur les sols gelés in-situ. Cela pourrait être en lien avec l'observation de degrés de saturation plus faibles au laboratoire que sur site ou un état de remaniement différent de l'échantillon prélevé.

3.1.2 Galerie traitée par jet-grouting

Les résultats des reconnaissances réalisées avant et après traitement par jet-grouting ont confirmé l'amélioration des caractéristiques mécaniques des zones traitées et la réduction de perméabilité. Les modules pressiométriques Ménard E_M et les modules d'Young E_{max} mesurés par les essais Cross-Hole sont améliorés d'un facteur 2 avec un traitement au jet grouting. La pression limite P_{LM} est augmentée quant à elle de 20 %.

Les essais de résistance à la compression sur échantillons montrent une valeur moyenne R_C de 3,7 MPa relativement homogène. L'analyse des essais met en évidence une résistance plus importante des échantillons prélevés suivant la direction verticale.

3.2 Modélisations numériques menées

3.2.1 Modélisation thermique

Les modélisations numériques liées au retro-calage thermique de la galerie de congélation ont été réalisées à l'aide du module thermique du logiciel Plaxis 2D (trois coupes transversales et une coupe longitudinale de la galerie d'essais). La synthèse des résultats des essais en laboratoire réalisés préalablement aux travaux de congélation a fourni les plages de variation des différentes grandeurs physiques requises par les calculs thermiques. Les sondes de congélations ont été modélisées comme des points de températures imposées, dont la température a été enregistrée par le dispositif d'auscultation durant l'expérience.

Selon les plages de variation identifiées des différents paramètres physiques (capacité et conductivité thermique, porosité, saturation), le rétro-calage du modèle a été réalisé en comparant les températures de l'ensemble des sondes aux prédictions du modèle. Ces

comparaisons ont été menées pour la phase de mise en froid rapide à l'azote liquide et pour la phase d'entretien du froid au temper.

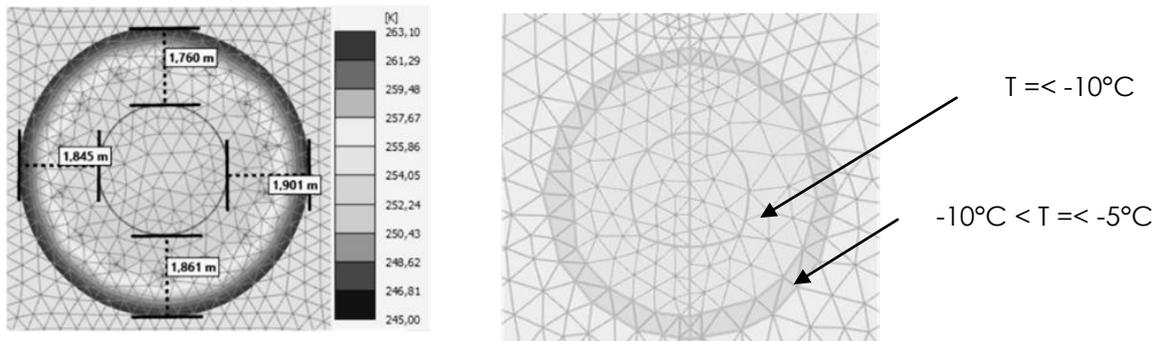


Figure 3 : Gauche : Coupe anneau SB gelé à $T < -10^{\circ}\text{C}$ (modélisation EF thermique). Droite : Coupe anneau de congélation $T < -10^{\circ}\text{C}$ en gris foncé, $-10^{\circ}\text{C} < T < -5^{\circ}\text{C}$ en gris clair.

Le modèle a permis de préciser les épaisseurs de sols gelés à différentes températures en vue de l'établissement du modèle mécanique ainsi que de réaliser des études paramétriques.

3.2.2 Modélisations mécaniques

Les modélisations numériques mécaniques de la galerie congelée ou traitée par jet-grouting ont été réalisées à l'aide du logiciel Plaxis en symétrie plane 2D sur la base d'une coupe transversale localisée à mi-longueur de chaque galerie.

Une loi de type Hardening Soil Model a été retenue pour les sols non traités. Une loi linéaire élastique avec un critère de rupture Mohr-Coulomb a été utilisée pour les Sables de Beauchamp gelés ou traités par jet-grouting. La synthèse des résultats d'essais a permis de caler les valeurs utilisées dans les différents modèles.

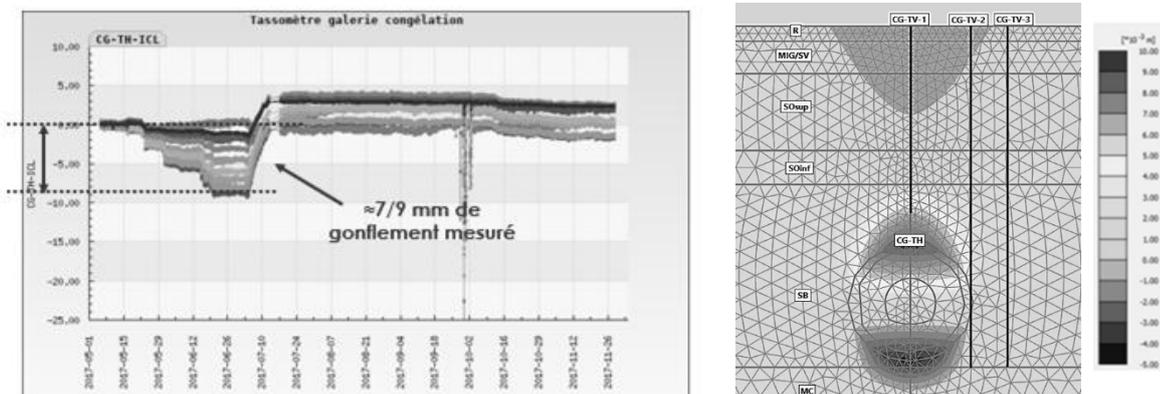


Figure 4. Gauche : Déplacements verticaux en fonction du temps au droit d'un tassomètre situé 1 m30 au-dessus du premier congélateur. Droite : Extrait déplacements verticaux phase de mise en froid du modèle EF.

Le rétro-calage des modèles numériques a été effectué sur la base des relevés du dispositif d'auscultation et selon les différentes phases de travaux : mise en froid (pour la galerie congelée), phase de creusement et phase d'observation. Au droit de la galerie congelée, le gonflement des sols observé lors de la mise en froid à l'azote liquide est modélisé au sein du modèle numérique par l'application d'une déformation volumique égale au taux de gonflement au gel mesuré en laboratoire.

3.3 Difficulté rencontrée

Pour les travaux de congélation, le point conceptuel difficile à appréhender a été la prise en compte des variations de température observées à l'entrée de la galerie congelée et de ses effets sur la température au sein du massif.

Au démarrage de la phase d'entretien au temper, avant ouverture de la galerie, des gradients de températures importants ont été observés par mesure selon l'axe longitudinal de la galerie. Les températures les plus élevées ont été observées à proximité des parois moulées (puits et tympan) tandis que les températures les plus froides furent relevées à mi-longueur de la galerie. Le puits (par renouvellement constant de l'air via la ventilation) ainsi que le tympan dans une moindre mesure se sont comportés comme des sources de chaleur qui réchauffaient le massif de sol congelé par ses deux extrémités.

La modélisation thermique suivant une coupe longitudinale a permis de visualiser ce phénomène en considérant comme condition limite les températures mesurées dans le puits et en intégrant les éléments de béton armé.

La mise en évidence de ce phénomène a requis la réalisation d'essais en laboratoire complémentaires afin de vérifier la stabilité de la galerie pour une température des sols gelés de -5°C.

Lors des travaux, un sas d'isolation thermique a été mis en œuvre afin de limiter les apports de calorie par le puits.

4 Comparaison des différentes techniques

4.1 Retour d'expérience (REX) sur le jet-grouting – Mise en œuvre

Le creusement de la galerie s'est déroulé sans incident. Ceci a été rendu possible par une approche prudente des travaux en considérant un risque fort de débouillage des Sables de Beauchamp.

Parmi les mesures mises en œuvre on retiendra :

- 1) La réalisation d'un plot d'essai de 4 colonnes (balayant une large gamme d'énergie) couplée à la mise en œuvre d'une méthode fiable de mesure du diamètre des colonnes (CylJet) permettant de choisir les paramètres adaptés pour la réalisation du jet et du maillage ;
- 2) Un maillage théorique (défini à l'issue du plot d'essais) basé sur des colonnes de 1,55 m de diamètre espacées tous les 1,20 m. Ce maillage présentait l'avantage d'intégrer une déviation de 0,5 % à 22 m et de pouvoir compenser d'éventuelles déviations supérieures par la réalisation de colonnes de diamètres plus importants (obtenus sur les colonnes d'essais).
- 3) Une méthode de réalisation des colonnes appropriée pour limiter les risques de zone non traitée entre les colonnes :
 - a. Utilisation de tiges de jetting à forte inertie (127mm) pour limiter les déviations ;
 - b. Perforation avec pression de poussée réduite pour limiter les déviations ;
 - c. Mesure (à l'intérieur des tiges de jetting) et intégration des déviations de forage avant réalisation des colonnes permettant l'ajustement éventuel des diamètres (1 m 55 à 1 m 85) et évitant ainsi le recours à des colonnes supplémentaires ;
 - d. La mise en œuvre d'un pas de découpage réduit (2 cm) afin de limiter la taille des « copeaux » de matériau (sables argileux) et ainsi éviter une sédimentation qui aurait pu affecter les caractéristiques mécaniques des colonnes.

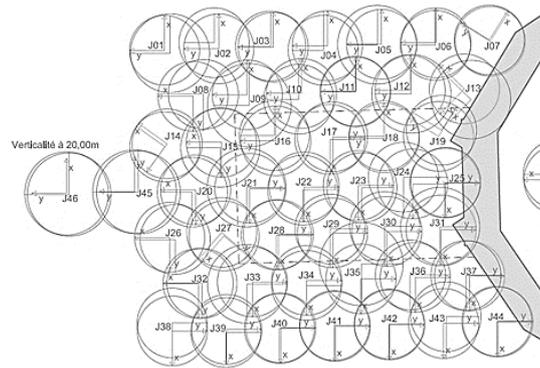


Figure 5 : Plan de récolement des colonnes de jet-grouting –diamètre au T.N. et à 20 m de profondeur.

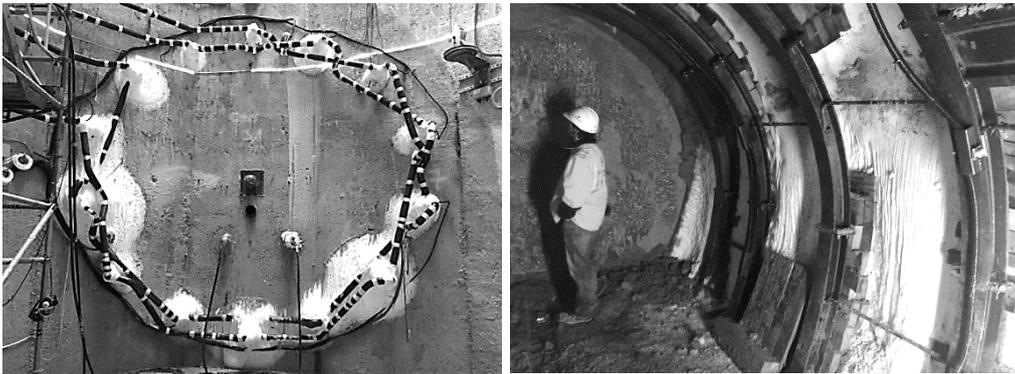


Figure 6 : Vue de la galerie congelée avant et après excavation

4.2 REX congélation - Mise en œuvre

La mise en œuvre de la congélation, d'autant plus en méthode mixte (mise en froid à l'azote liquide et entretien à la saumure), a été riche d'enseignements.

Les principaux éléments à retenir sont :

- 1) Concernant les essais sur sol congelé
 - a. Un délai d'au moins 4 à 6 mois pour les réalisations des prélèvements (carottage) et des essais en laboratoire (caractérisation et définition des propriétés thermiques et mécaniques) est à prévoir ;
 - b. La nécessité de réaliser des essais à différentes températures (majoritairement à -10°C mais aussi -20°C et -5°C) pour appréhender le comportement du massif dans l'éventualité où la distribution des températures ne serait pas celle prévue ;
 - c. Privilégier des essais mécaniques sur sol congelé en laboratoire. Cette approche aboutit à des valeurs sécuritaires vis-à-vis de la rupture par rapport aux essais menés sur échantillons de sol congelé in-situ.
- 2) Concernant la mise en œuvre de la congélation mixte
 - a. L'analyse de la distribution des températures en fonction de la distance au congélateur le plus proche requiert une mesure précise de la position des forages de contrôle et des congélateurs ;
 - b. La possibilité de conserver le même équipement des congélateurs pour la mise en froid et l'entretien ;
 - c. La possibilité de passer à la saumure directement après l'azote (sous 12 h) à condition que celle-ci ne soit pas préalablement refroidie à -30°C . On observe alors un transfert de calories de la saumure « chaude » vers le terrain ;

- d. Hors imprévu, le gain réel d'un recours à l'azote pour la mise en froid est d'environ 3 semaines en intégrant 1 semaine de transition pour permettre aux températures de se stabiliser avant excavation. Ce gain est à mettre en regard du surcoût lié à l'usage de l'azote liquide ;
- e. Prendre en compte la présence des sources de chaleur éventuelles (paroi moulée et ventilation du puits en été) pour dimensionner les groupes froids et compenser au mieux leurs effets sur la distribution longitudinale des températures;
- f. La redondance des forages de contrôle de température est importante.

5 Conclusion

Pour éprouver les méthodes d'étanchement de la formation des Sables de Beauchamp pour l'excavation des galeries pour la ligne 16 du Grand Paris, un puits d'essais a été construit à Aulnay en Seine Saint Denis.

Les apports de ce puits d'essais sont :

- Une quantification de l'amélioration des caractéristiques mécaniques des Sables de Beauchamp par jet-grouting ;
- Une qualification du comportement mécanique et thermique des Sables de Beauchamp congelés.

La mise en œuvre de simulation numérique thermique et mécanique pour vérifier le comportement global de l'ouvrage a permis de mettre en évidence des points de vigilance lors de l'usage de la congélation.

En travaux, le puits d'essai a permis d'observer le comportement des massifs de sol traités et de mettre en avant des points de vigilance à avoir pour le choix des méthodes et lors du suivi des travaux.

Pour choisir au mieux le procédé de traitement, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance du sous-sol et des paramètres environnementaux (température extérieure, contexte hydrogéologique, géologique...) et des emprises disponibles ayant une incidence sur le choix des méthodes et la conception des ouvrages associés. Pour une meilleure maîtrise de l'aléa, la meilleure connaissance possible de la variation des paramètres clés du sous-sol ayant une incidence sur les méthodes est requise.

Pour finir, une analyse coût / bénéfices de la méthode pour le projet est à mener en considérant les aléas possibles lors de la mise en œuvre.

Les auteurs souhaitent remercier la société du Grand Paris pour le financement ainsi que son personnel pour sa contribution dans l'aboutissement du projet de puits d'essais de la L16 à Aulnay-sous-Bois.

6 Références bibliographiques

- Asri I. et al. (2018). « Congélation et Jet grouting dans les Sables de Beauchamp à Aulnay sous Bois » Travaux N°942 pp 86-93.
- Giroux A., Leconte B., Rot J. (2019) "Test Shaft of Aulnay sous Bois Ground Freezing and jet grouting" Conference on underground metro line 16 by Comité Français de Mécanique des sols, Paris
- Konrad, J.M. and Morgenstern, N.R. (1981). The segregation potential of a freezing soil. Canadian Geotechnical Journal, 18: 482-491.
- L'application de la congélation du sol aux travaux souterrains (1985). Tunnels et ouvrages souterrains, revue bimestrielle, n°69.