

## Grand Paris Express - Ligne 16

Puits d'essais d'Aulnay-Sous-Bois  
Congélation et Jet grouting

Présentation CFMS du 21/03/2019

A. Giroux – B. Leconte – J. Rot



# Sommaire

- 1/ Présentation du puits d'essai d'Aulnay
- 2/ Reconnaissances et instrumentations
- 3/ Exploitation des résultats
- 4/ REX Jet grouting et congélation mixte



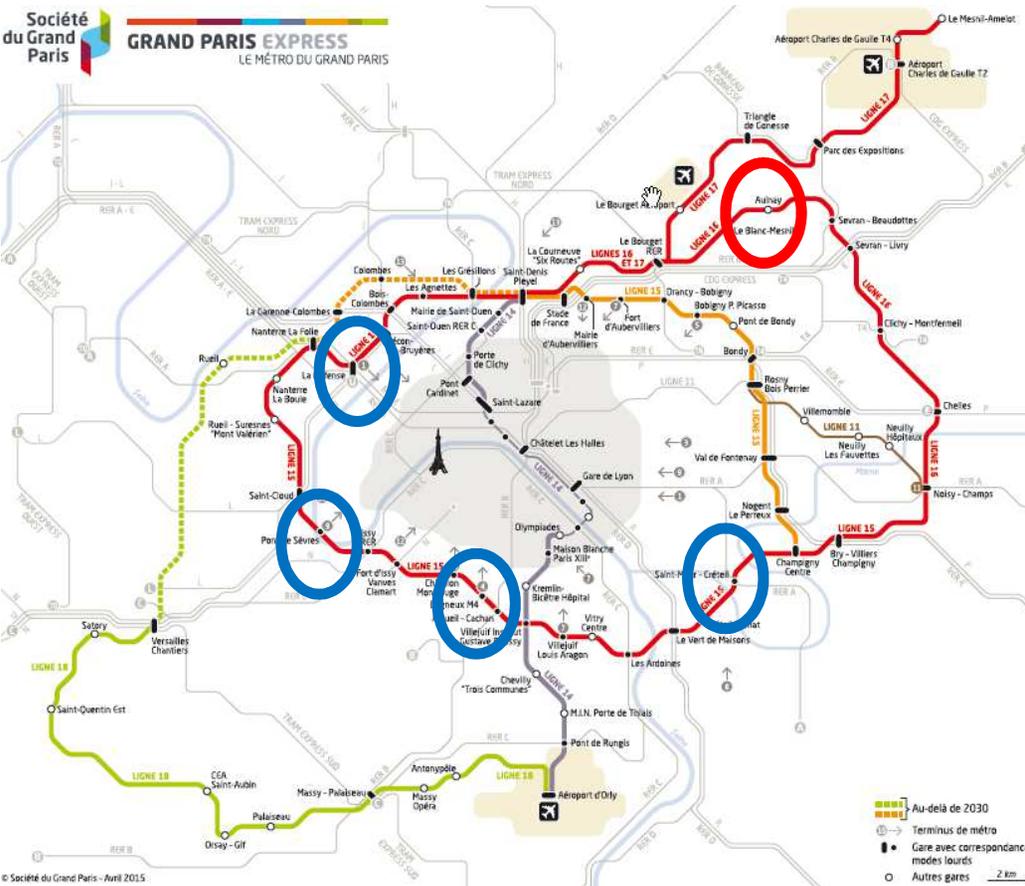
# 1 – Présentation du puits d'essai

PE d'Aulnay:

- 50% Génie-civil
- 35% Rameaux
- 15% Géotec.

## OBJECTIFS

1. Sable de Beauchamp initial et traité
2. Définir les paramètres à retenir
3. Lancer un premier marché
4. Tester traitement en condition réelle



# 1 – Présentation du puits d'essai

## Mandataire du Groupement



**SOLETANCHE BACHY**

## Cotraitants



## Sous-traitants



## MOA



## AMO



## MOE

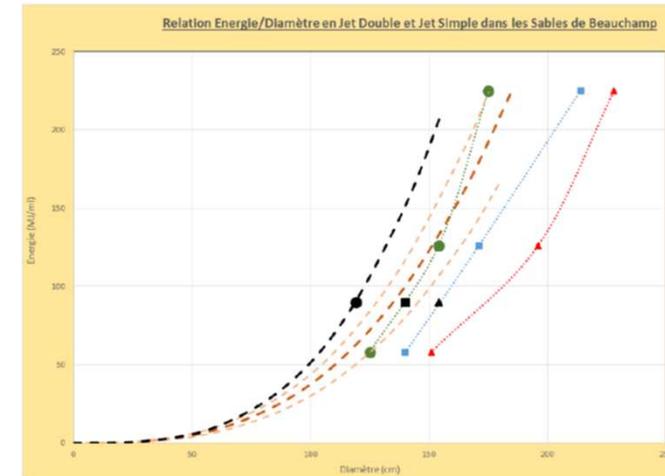
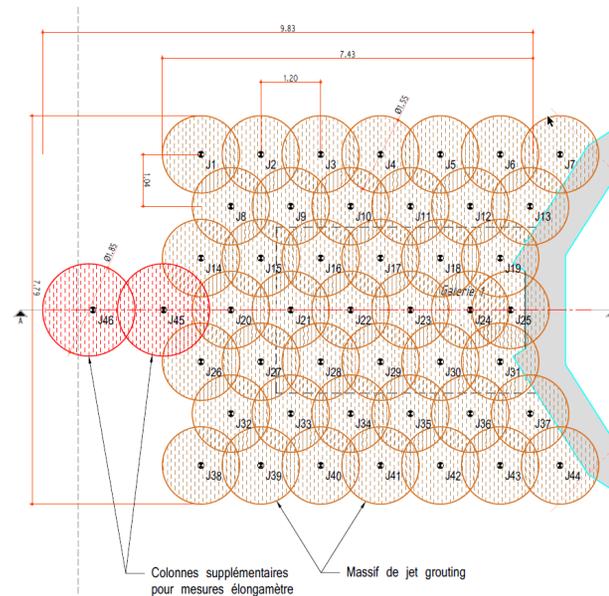


**TRACTEBEL**





# 1 – Présentation du puits d'essai – jet grouting



## Colonnes d'essais

- 4 colonnes d'essais en jet double (3 hors puits et 1 dans le puits) – entre 23m et 14m
- 1 colonne d'essai en jet simple PLUS (hors puits)
- Energies de jetting comprises entre 60 et 225 Mj/ml (90Mj/ml en simple PLUS)
- Diamètres mini obtenus : 1,25-1,75m en double et 1,2m en simple Plus
- Dosage coulis entre 430 et 450Kg/m3 (CEM III C) => Rc28j > 3MPa
- Mesures des déviations de forage via chaîne inclinométrique
- Diamètre des colonnes estimés via méthode Cyljet ©
- Comparaison avec diamètres réellement mesurés lors du terrassement du puits (plus tard)  
=> Les diamètres réels sont supérieurs d'environ 5 à 15% par rapport Cyljet

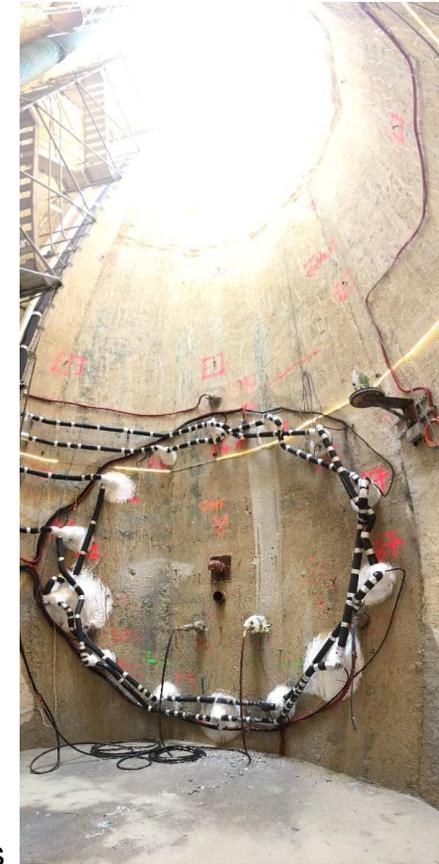
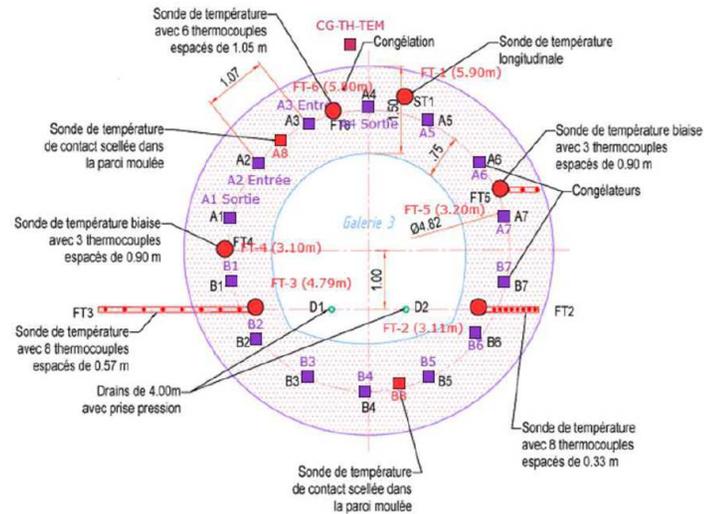
Présentation puits d'essais - Aulnay-Sous-Bois

## Exécution

- Révisions du maillage => 44 colonnes de production – Maille 1,2m équilatérale
- jet double retenu
- Paramètres réajustés suite à mesures CylJet sur les 2 premières colonnes de production
- Diamètre des colonnes compris entre 1,55 et 1,85m (énergies de 140 à 230MJ/ml)
- Dosage coulis 450kg/m3 CEM III C
- Rc > 3,5MPa sur l'ensemble des colonnes
- Déviation < 1%

21/03/2019

# 1 – Présentation du puits d'essai -congélation

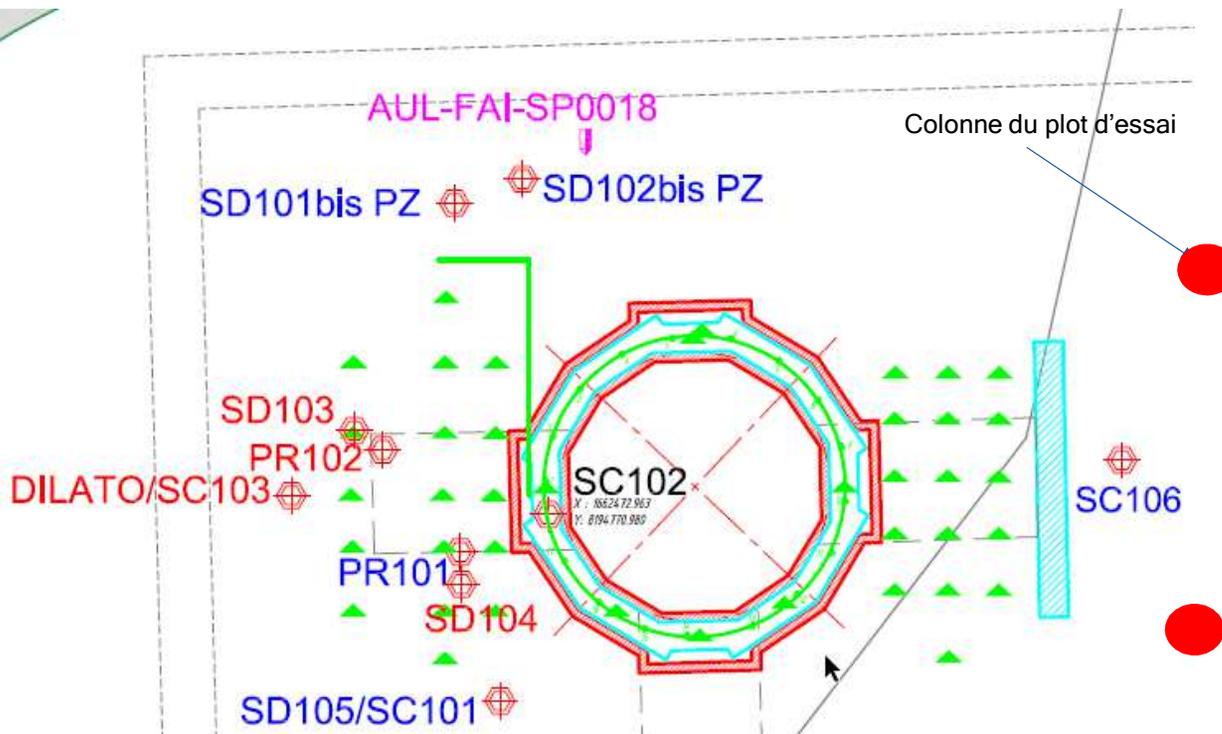


- 14 congélateurs forés sous SAS – Longueur 5-7m
- 1 seul anneau de congélateurs disposés à 75cm de l'excavation
- Congélation mixte : Mise en froid à l'azote liquide, entretien au Temper
- Matériaux (inox) et isolation adaptés aux températures cryogéniques
- Diamètres des congélateurs adaptés au débit de Temper
- 3 sondes de contrôle initialement prévues – 2 rajoutées ultérieurement
- 2 drains disposés au cœur de la galerie pour dissipation des pressions et vidange avant ouverture
- Cœur entièrement congelé à -10°C après 2 mois d'entretien avant ouverture (Délais suite reprise des calculs)

Présentation puits d'essais - Aulnay-Sous-Bois

21/03/2019

## 2 – Reconnaissances et instrumentations



Présentation puits d'essais

### Terrain avant traitement

- 2 piézomètres
- 1 carotté + identification GTR en labo
- 1 cross-hole (Poisson, Module ...)
- 1 pressiomètre

### Terrain traité jet grouting

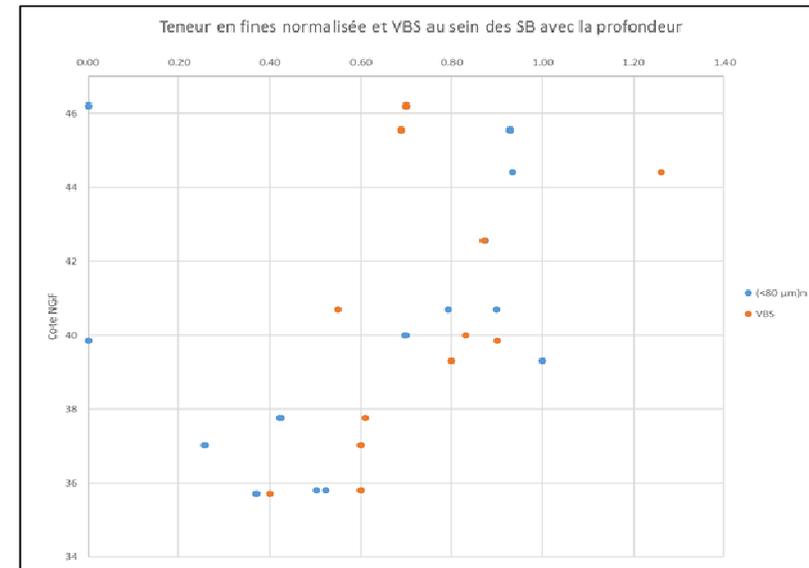
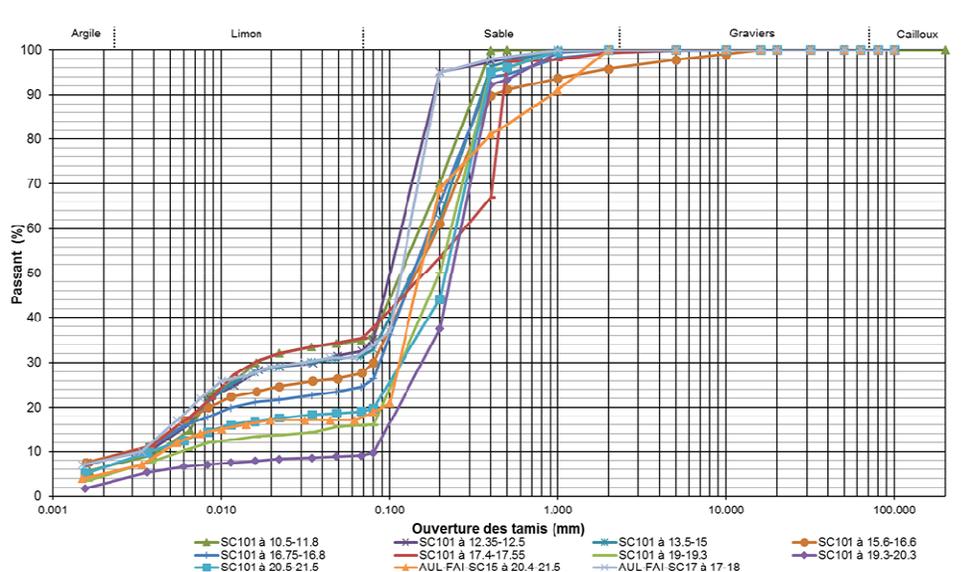
- 2 carottés (H + V) + Rc + soniques
- 1 dilatomètre (4 mesures)
- 1 pressiomètre HP
- 1 cross-hole
- 3 essais au vérin plat (Etat de contrainte)
- 3 essais à la plaque (Modules)
- Prélèvements in situ + Rc H/V

### Terrain congelé

- 3 essais au vérin plat
- Essais labo (Rc / Fluage / gonflement)
- Prélèvements in-situ

## 2 – Reconnaissances et instrumentations

### Sables de Beauchamp avant traitement



- Sables argileux à silteux grisâtre : Beauchamp indifférencié
- Absence de :
  - Gypse
  - Passage induré;
  - Ecran médian

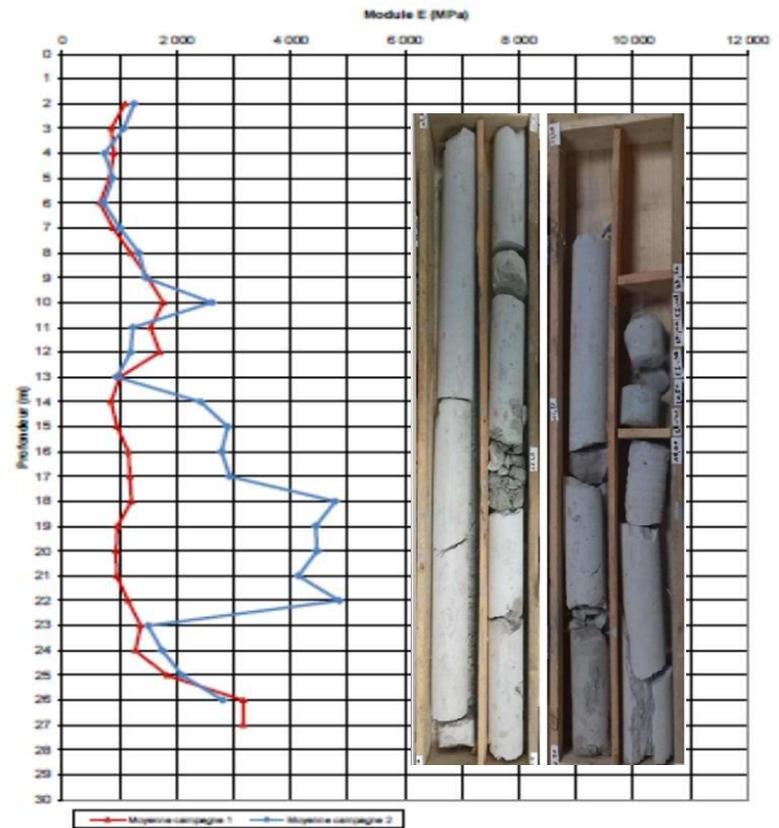
- Principaux résultats :
  - Pressiométriques:  $PI^*=5,8 \text{ MPa}$        $Em \text{ 79 MPa}$
  - Crossholes:  $E=1184 \text{ Mpa}$        $G = 404 \text{ Mpa}$

## 2 – Reconnaissances et instrumentations

### Sables de Beauchamp traités par jet-grouting

➤ Principaux résultats :

- Pressiométriques:  $E_m = 76\text{MPa}$   $PI^* = 6,1\text{MPa}$
- Crossholes:  $E = 2770\text{MPa}$   $G = 973\text{MPa}$
- Dilatomètre:  $E = 610 \text{ à } 1500\text{MPa}$
- Rc verticale:  $E = 4800\text{MPa}$   $R_c = 3,7\text{MPa}$
- Plaque:  $E = 1000 \text{ à } 5000\text{MPa}$   $G = 300 \text{ à } 3400\text{MPa}$



Essai dilatométrique

## 2 – Reconnaissances et instrumentations

### Sables de Beauchamp traités par congélation

ESSAIS	température	-5°C	-10°C		-15°C
	échant. congelé	en labo	en labo	in situ	en labo
compression	Rc (MPa)	4	9.6	12.3	
module	Ey (MPa)	90	516	491	
fluage triaxial	A (m <sup>2</sup> /MN) <sup>2</sup> .h <sup>-C</sup>	0.0006	0.00089	0.00239	
	B	2.15	2.15	1.21	2.15
	C	0.043	0.043	0.076	
fluage uniaxial	A (m <sup>2</sup> /MN) <sup>2</sup> .h <sup>-C</sup>		0.00089	0.00089	0.00239
	B		3.17	3.17	1.62
	C		0.076	0.076	0.076

Paramètres mesurés sur échantillons prélevés « in situ » meilleurs que ceux déterminés à partir des essais sur sol reconstitué et congelé « en labo »



## 2 – Reconnaissances et instrumentations

### INSTRUMENTATION

#### ➤ Paroi:

- Inclinomètre vertical,
- Convergence.

#### ➤ Rameaux

- Cible topo surface
- Tassomètre et inclinomètre verticaux
- Inclinomètre horizontal + temp.
- Elongamètre
- Convergence des rameaux
- Cible topo rameaux
- Corde vibrante

+ Spécifique à la congélation :

- 17 sondes de températures (cong.)



# 3- Exploitation des résultats

---

## Objectifs

Construction de modèle(s) aux éléments finis reflétant numériquement l'expérience menée sur site dans le but de :

### Pour les travaux de congélation :

- Valider les paramètres thermiques des SB par rapport aux résultats en laboratoire;
- Effectuer des études paramétriques afin d'évaluer l'incidence des différents paramètres;
- Evaluer l'épaisseur de l'anneau de glace formé (*épaisseur minimale de 1m50 sous -10°C*);
- Valider les paramètres mécaniques des SB traités par congélation par rapport aux résultats en laboratoire et in-situ.

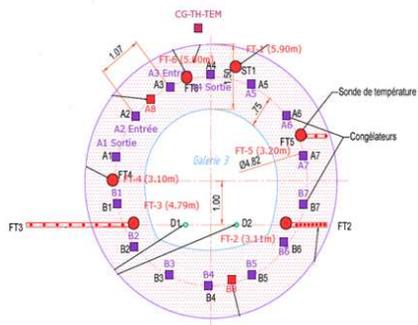
### Pour les travaux de jet-grouting :

- Valider les paramètres mécaniques des SB traités par jet-grouting par rapport aux résultats en laboratoire et in-situ.

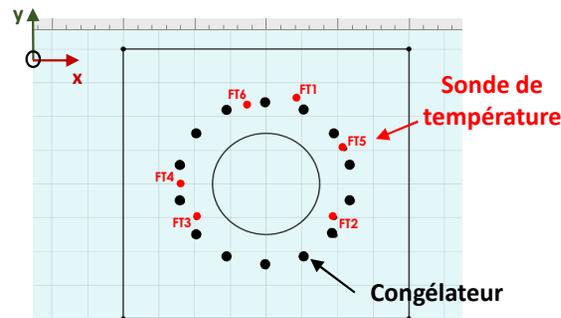
# 3- Exploitation des résultats

## Modélisation thermique – Principe

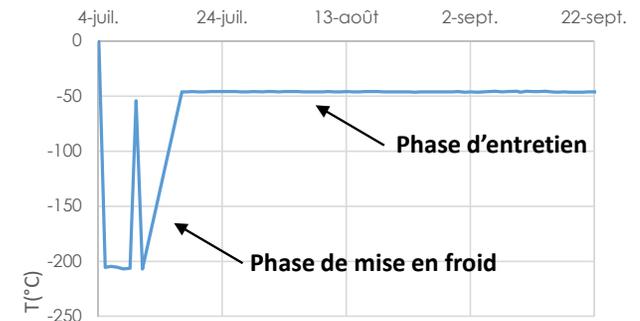
- Modélisation aux éléments finis bidimensionnelle à l'aide du logiciel Plaxis 2D module Thermal selon 3 coupes transversales à la longueur de la galerie;
- Introduction dans le modèle des températures enregistrées jour par jour par l'auscultation au sein des congélateurs comme des points de température imposée;



Extrait du dispositif de congélation



Extrait du modèle EF

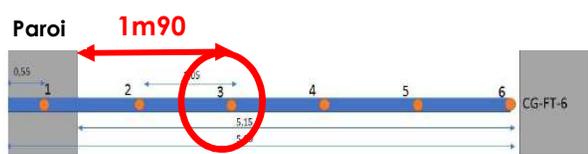
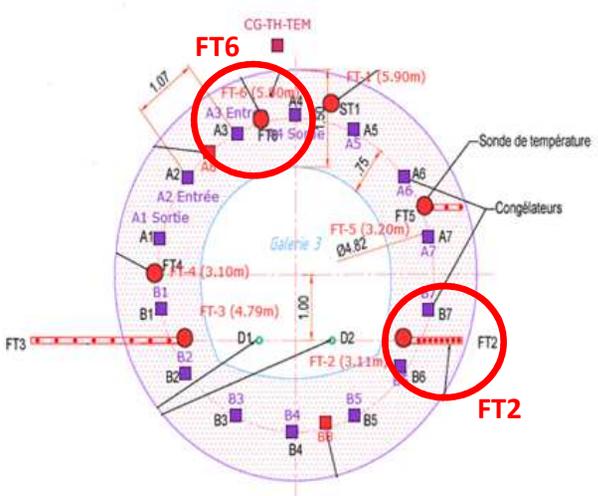


Relevé de température au sein du congélateur A7

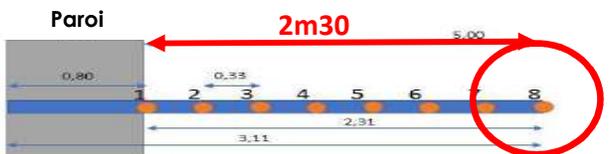
- Retro-calage du modèle selon les résultats de l'auscultation à partir des plages de variation des caractéristiques thermiques et physiques des SB mesurées en laboratoire (conductivité et capacité thermique,  $Wu$ ,  $S$ ,  $n$ ,  $\rho$ ).

# 3- Exploitation des résultats

## Modélisation thermique – Retro-calage

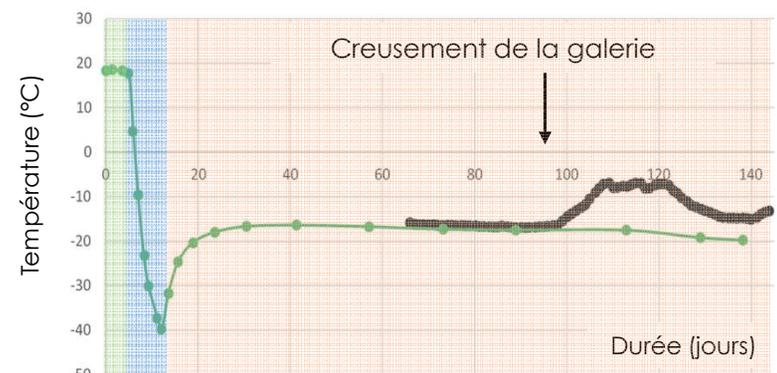


Position du point de mesure en FT6-3

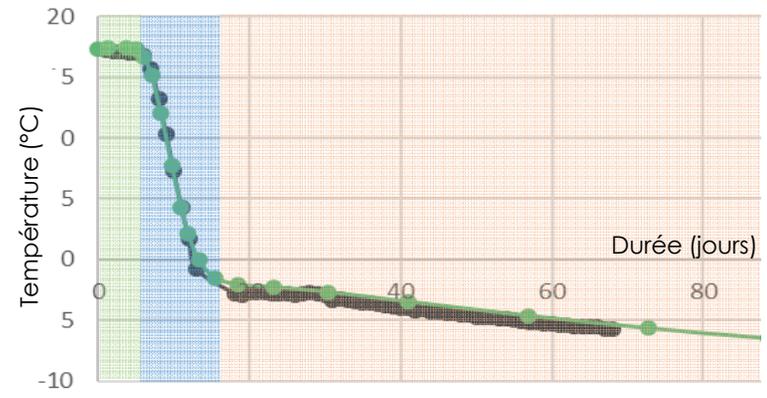


Position du point de mesure FT2-8

- Etat initial
- Mise en froid à l'azote
- Entretien au temper
- Relevé de température de la sonde
- Estimation de température du modèle EF



Analyse comparative de retro-calage en FT6-3

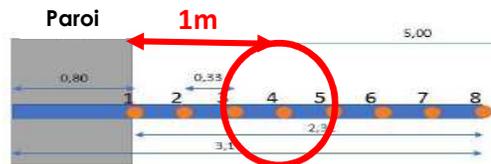


Analyse comparative de retro-calage en FT2-8

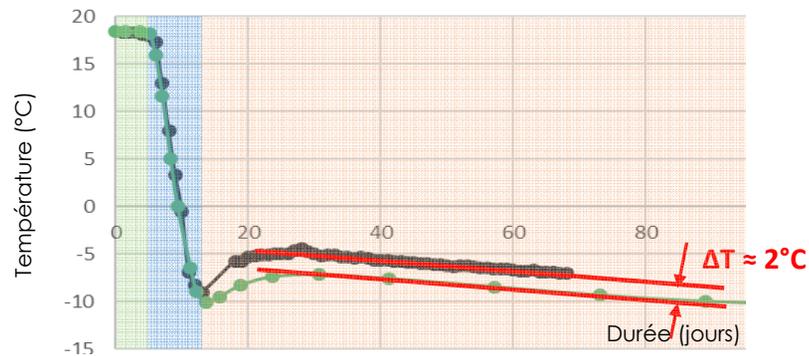
### 3- Exploitation des résultats

#### Modélisation thermique – « l'effet de bord »

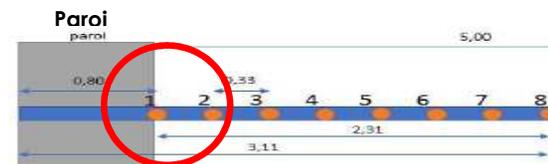
- Caractérisation de « l'effet de bord » lié à l'apport de chaleur par le puits et sa ventilation :



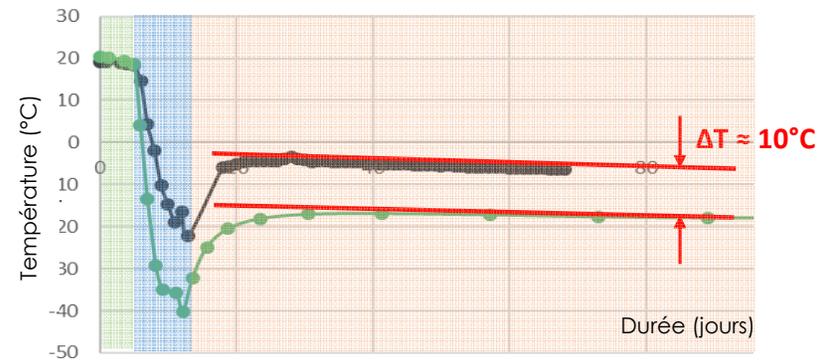
Position du point de mesure FT2-4



Analyse comparative de retro-calage en FT2-4



Position du point de mesure FT2-1

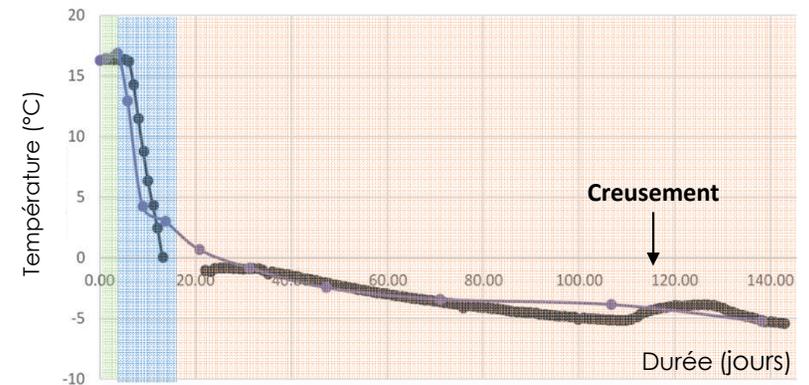
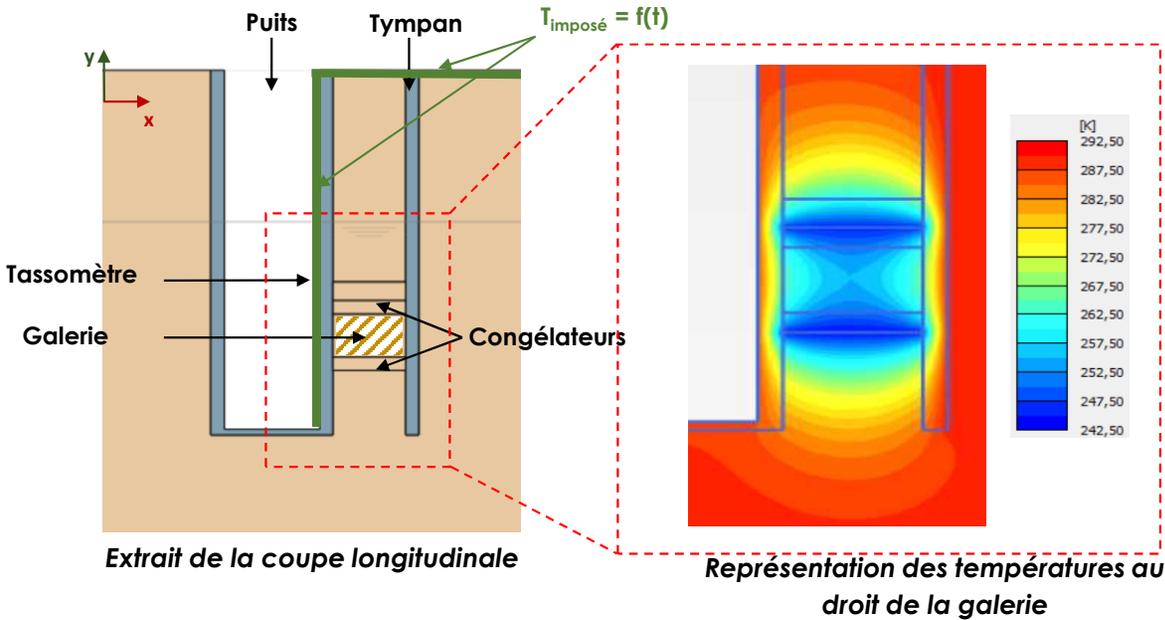


Analyse comparative de retro-calage en FT2-1

# 3- Exploitation des résultats

## Modélisation thermique – « l'effet de bord »

- Réalisation d'une coupe longitudinale avec introduction dans le modèle des températures mesurées dans le puits et en surface en fonction du temps.



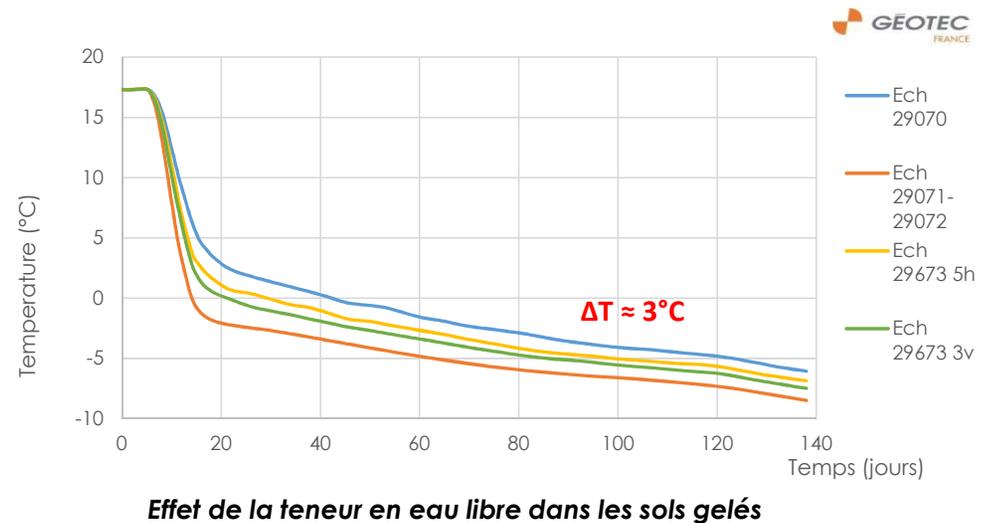
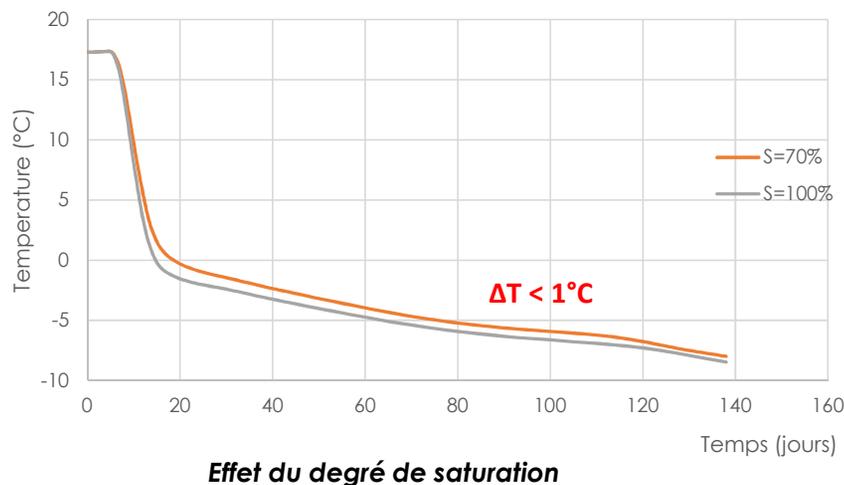
● Relevé de température de la sonde      ● Estimation de température du modèle EF

*Analyse comparative de retro-calage au droit du tassomètre*

### 3- Exploitation des résultats

#### Modélisation thermique – Etudes paramétriques

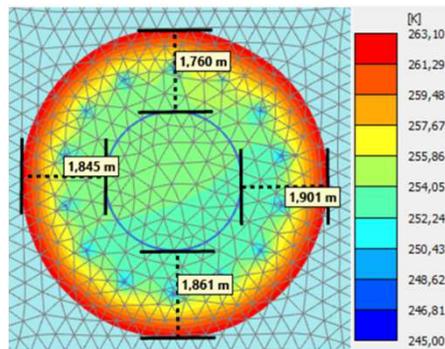
- Identification des paramètres « forts » et « faibles » agissant sur l'équilibre thermique selon les plages de variation identifiées;
- Réalisation des calculs, paramètre par paramètre, à partir du modèle retro-calé au droit d'un point d'observation non perturbé par l'effet de bord (*tassomètre au milieu de la galerie*).



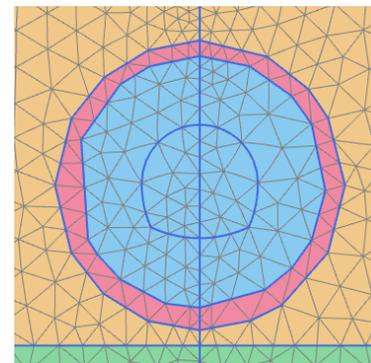
### 3- Exploitation des résultats

#### Modélisation thermique – Vers la modélisation mécanique

- Principe de modélisation de l'anneau de congélation :



Coupe anneau SB congelés à  $T < -10^{\circ}\text{C}$  (modélisation EF thermique)



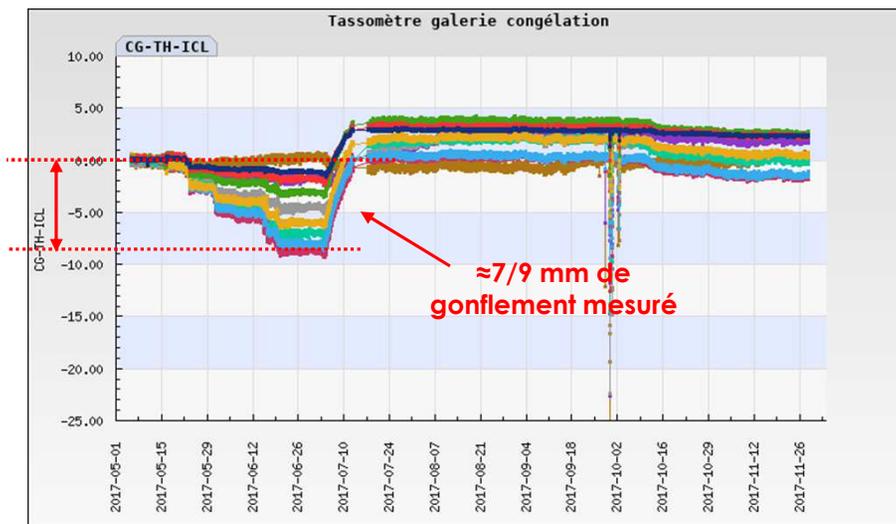
Coupe anneau de congélation  
 $T < -10^{\circ}\text{C}$  en bleu,  $-5^{\circ}\text{C} < T < -10^{\circ}\text{C}$  en rose

- Prise en compte d'une loi de comportement linéaire élastique avec un critère de rupture Mohr-Coulomb pour les SB gelés;
- Retro-calage des paramètres selon les résultats de l'auscultation à partir des plages de variation des résultats des essais en laboratoire sur SB gelés (UCS, fluage, gonflement).

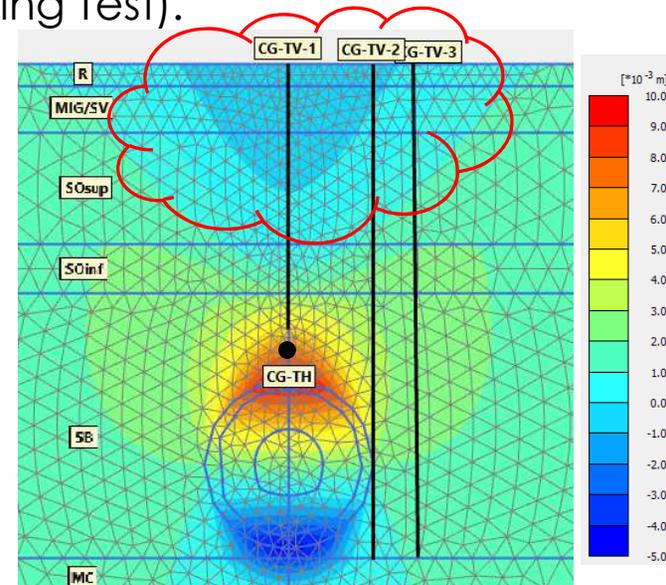
# 3- Exploitation des résultats

## Modélisation mécanique de la congélation – Phase de mise en froid

- Observation d'un gonflement lié au changement de phase de l'eau interstitielle et à la formation de lentilles de glace;
- Application au sein du modèle d'une déformation volumique proche du taux de gonflement estimé en laboratoire (Frost Swelling Test).



Relevé déformations verticales au droit du tassomètre CG-TH



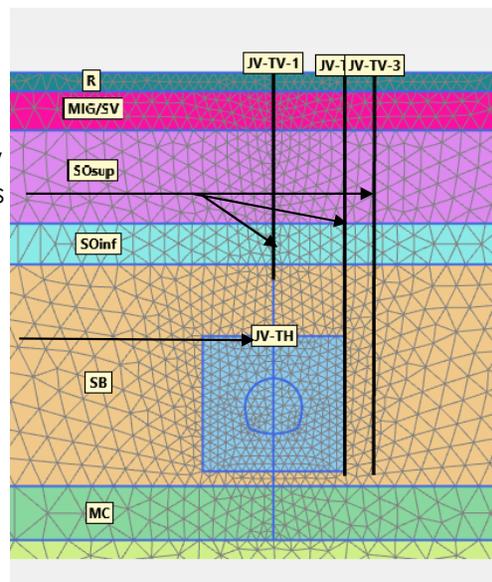
Gonflement quasi-nul en surface, conformément aux relevés des sondes de surface

Extrait déformations verticales du modèle EF

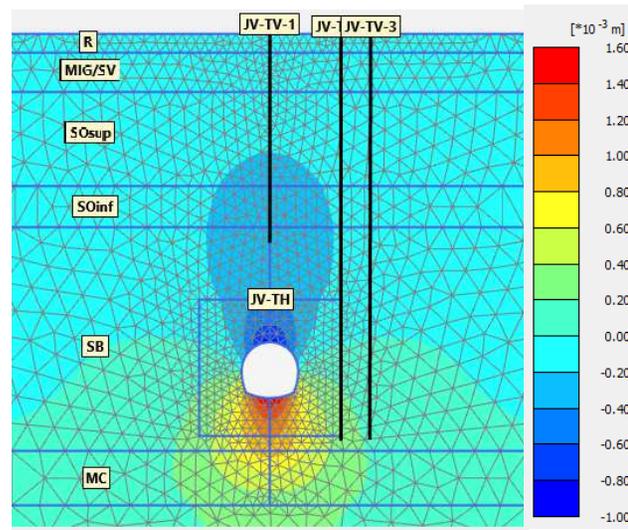
# 3- Exploitation des résultats

## Modélisation mécanique du jet-grouting – Principaux résultats

- Principe de modélisation similaire au massif de sol traité par congélation;
- Détermination des paramètres de loi de comportement à partir des résultats des essais en laboratoire ( $R_c$ ,  $\rho$ ) et in situ (dilatomètre);



Vue du modèle EF jet-grouting



Résultats liés à la phase de creusement

- Très faibles déformations corrélées aux résultats de l'auscultation (1 à 2 mm).

# 4- REX jet grouting

## Les clés du succès en Jet-grouting :

- 1) Une reconnaissance détaillée pour apprécier la stratigraphie globale et les caractéristiques des SB (% fines, grésification ...)
- 2) La réalisation systématique d'un plot d'essais avec mise en œuvre d'une méthode fiable de mesure du diamètre des colonnes
- 3) La mise en œuvre d'un phasage adapté
- 4) La prise en compte, dans les SB argileux, du risque lié à la formation de poche argilo-sableuse par sédimentation
- 5) La maîtrise des déviations de forage et une géométrie des colonnes adaptée (maille)
  - Dalle béton armé avec réservation pour une mise en station soignée de la foreuse (50% des déviations sont dues à un défaut de mise en station)
  - Train de tiges à forte inertie (sur Aulnay => jet triple 127mm)
  - Perforation avec pression de poussée réduite pour limiter le flambement des tiges
  - Adéquation entre diamètre des tiges et diamètre de perforation (compromis à trouver => dépouille la plus faible tout en garantissant la bonne remontée des rejets)
  - Méthodologie de mesure des déviations adaptée => mesure des déviations dans le train de tiges **AVANT** jetting => Permet un ajustement des diamètres (au travers de paramètres de jetting) pour limiter les colonnes additionnelles (risque d'effet masque)
  - Elargissement en pied et en tête des colonnes secondaires

Présentation puits d'essais - Aulnay-Sous-Bois



# 4- REX congélation mixte

## Les points importants à retenir :

- 1) Nécessité d'essais préalables en laboratoire sur sol congelé (caractérisation, paramètres thermiques, paramètres mécaniques, gonflement). Précautions à prendre :
  - Prévoir un délai de 4 à 6 mois
  - Importance de la qualité des prélèvements => échantillons intacts => essais plus représentatifs
  - Essais à  $-10^{\circ}\text{C}$  principalement mais prévoir quelques essais à  $-5^{\circ}\text{C}$  et  $-20^{\circ}\text{C}$

Les essais sur prélèvements in situ donnent des résultats légèrement meilleurs => approche sécuritaire des essais en laboratoire.

- 2) Possibilité de conserver le même équipement pour les congélateurs entre azote et saumure (temper) => il n'est pas fondamentalement nécessaire de changer le diamètre du tube intérieur surtout si les congélateurs sont disposés en séries.

- 3) Importance de la température des groupes frigorifiques =>  $-30^{\circ}\text{C}$  suffit en théorie mais  $-35^{\circ}\text{C}$  est préférable pour gérer des situations non prévisibles. Sensibilité de la congélation aux sources de chaleur parasites.

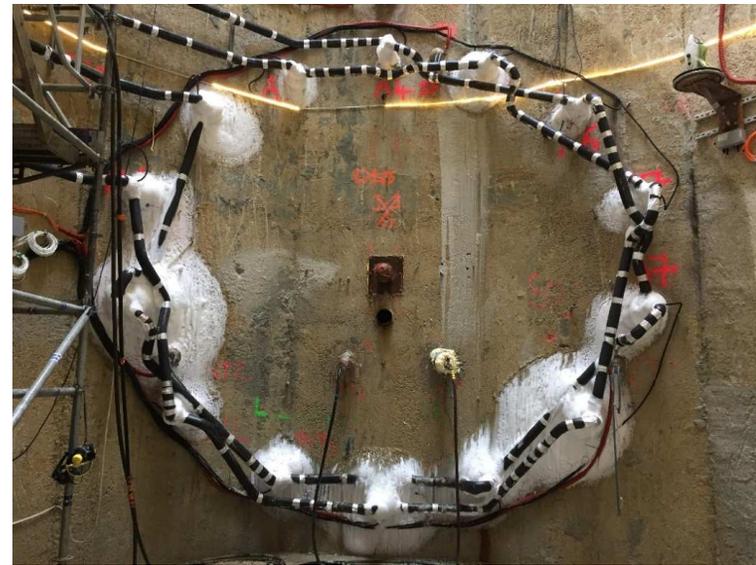
- 4) Importance du SAS mis en place à l'entrée de la galerie

- 5) Importance des sondes de contrôle de température. Préférer la redondance en début de chantier plutôt que d'avoir à refaire des forages dans un massif congelé.

- 6) Mesures des déviations des congélateurs et des sondes de température indispensables.

- 7) Gestion de la transition entre azote liquide et saumure. Hors imprévu, le réel gain de temps apporté par une mise en froid à l'azote est de 3 semaines env. => à mettre au regard du surcoût.

- 8) Difficulté à excaver le terrain congelé par rapport au terrain traité par jet-grouting.



## 4- REX - Congélation VS Jet-Grouting

Technique	Inconvénients	Avantages
<b>Jet-Grouting</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emprise nécessaire en surface pour installation et gestion des rejets.</li> <li>- Gros volume de rejets à gérer et évacuer.</li> <li>- Maîtrise des déviations de forage chronophage et coûteuse.</li> <li>- Risque croissant de laisser des zones non traitées avec la profondeur et l'inclinaison des forages.</li> <li>- Limitation en profondeur à 25-35m dans les SB compte tenu du risque et des diamètres de colonnes réalisables (géométrie).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Délais =&gt; phasage de réalisation</li> <li>- Coût</li> <li>- Traitement depuis la surface =&gt; pas de SAS</li> </ul>
<b>Congélation Mixte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût</li> <li>- Gestion de l'azote surtout en souterrain =&gt; précautions</li> <li>- Gestion des sources de chaleur parasites surtout pendant la phase d'entretien</li> <li>- Délais =&gt; phasage de réalisation</li> <li>- Délais nécessaires pour réalisation des essais préalables</li> <li>- Forage sous SAS</li> <li>- Gestion des deux modes de congélation</li> <li>- Gestion des déviations sur de grandes longueurs</li> <li>- Gestion de la décongélation dans certains cas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sécurité apportée par la technique</li> <li>- Toutes profondeurs</li> <li>- Pas de travaux de forage en surface</li> <li>- Traitement provisoire</li> </ul>

# CONCLUSION

Les deux galeries ont pu être excavées => succès !!

Un plot d'essais riche en retours d'expériences pour tous les intervenants

Meilleur appréhension des critères de choix de l'une ou l'autre des techniques :

- Le risque technique (débouillage des SB) en lien avec la profondeur et/ou la longueur du traitement
- L'emprise(s) disponible(s) en surface (dimensions, réseaux, gestion des rejets ...)
- Le phasage des travaux et les délais
- Le coût



## Annexe

---

Revue de presse:

Picaud E. (2018) GPE Jet grouting versus congélation. *Le Moniteur* 30/08/18 pp 32-34.

Morelli P. (2018) Puits d'essai d'Aulnay sous Bois: Congélation et jet grouting face à face dans les Sables de Beauchamp. *Solscopemag* n°10 pp 36-40.

Asri I., Rot J., Aldayeh H. et Giroux A. (2018) Congélation et Jet grouting dans les Sables de Beauchamp à Aulnay sous Bois. *Travaux N°942* pp 86-93.

# Merci de votre attention !

### 3- Exploitation des résultats

#### Modélisation thermique – Principe du calcul

- Modélisation de la diffusion de froid apporté par la CG selon les lois de la thermique, dont les 2 paramètres principaux sont la capacité thermique C et la conductivité thermique  $\lambda$  ;
- La capacité thermique C et la conductivité thermique  $\lambda$  sont définies à l'état initial, et varient dans les calculs selon la diminution de température et la proportion de chacune des phases du sol (solide, liquide, gaz).

$$\rho C = (1 - n)\rho_s C_s + nS\rho_w \left( C_w + l \frac{dw_u}{dT} \right) + n(1 - S)\rho_v C_v$$
$$\lambda = (1 - n)\lambda_s + nS[w_u\lambda_w + (1 - w_u)\lambda_l] + n(1 - S)\lambda_g$$

- La chaleur latente (l) lors du changement de phase de l'eau (liquide à solide) est prise en compte en fonction du % d'eau libre dans les sols gelés ( $w_u$ ).