cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

LA CONGÉLATION _
ARTIFICIAL FREEZING OF SOILS, *IN CIVIL ENGINEERING*

Puits d'essai d'Aulnay-sous-Bois : rétro-analyse numérique des travaux de congélation des Sables de Beauchamp

CFMS SCIENTIFIC AND TECHNICAL DAY _ NOVEMBER 17TH 2023

GÉOTEC

JONATHAN ROT

cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Sommaire :

Présentation du puits

Reconnaissances préalables à la congélation

Description de l'auscultation

Modélisations numériques et calage des modèles

Difficultés rencontrées et solutions mises en place

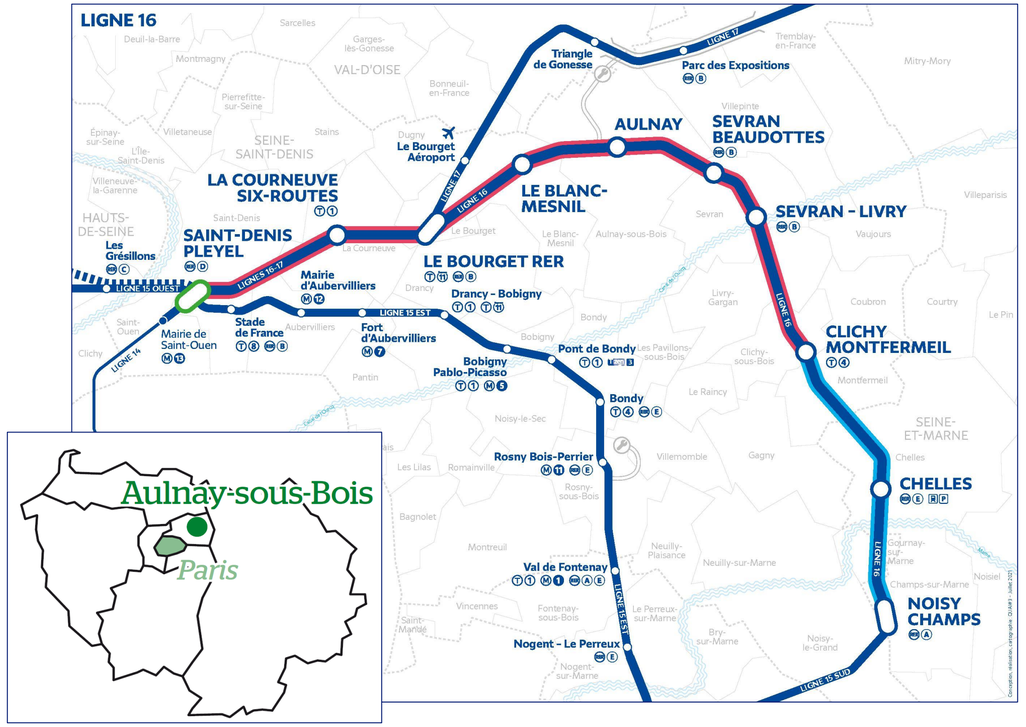
Conclusions/Recommandations

cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Présentation du puits d'essai

Présentation du puits d’essai

- **Ouvrage de reconnaissance géotechnique exceptionnel** dans le cadre du projet Grand Paris Express, ligne 16 ;
- **Etude en vrai grandeur** des conditions de réalisation des rameaux de liaison à réaliser de manière « traditionnelle » dans des matériaux sableux sous nappe (Sables de Beauchamp)
- Objectifs :
  - Parfaire la connaissance géotechnique des Sables de Beauchamp ;
  - Valider in-situ deux méthodes de traitement : jet-grouting et congélation ;
  - Proposer des paramètres de dimensionnement à l’issue des retro-analyses ;
  - Tester les modèles à partir des paramètres mesurés sur la ligne 16.



Localisation de la ligne 16 et d’Aulnay-sous-Bois

Présentation du puits d'essai

Les intervenants :

Grand Paris express

MOA

Société du Grand Paris

AMO

ARTEMIS
ARTELIA · ARCADIS · BG
AMO GÉNÉRAL SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

MOE

egis

TRACTEBEL
ENGIE

Mandataire du Groupement

SOLETANCHE BACHY

Cotraitants

sade

SOLETANCHE BACHY TUNNELS

Sous-traitants

GÉOTEC
ENSEMBLE, CONCEVONS UN AVENIR DURABLE

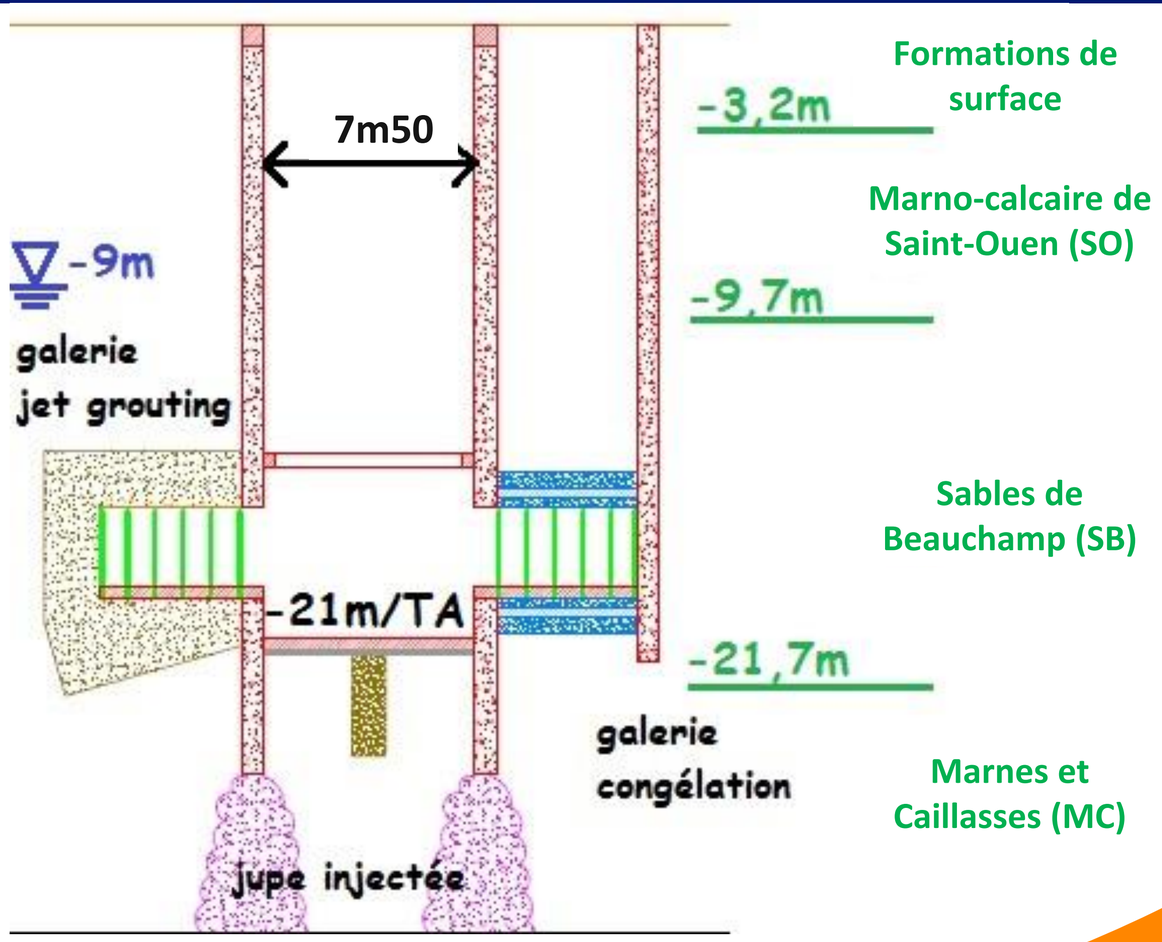
SOLEXPERTS

SAPERFE

Présentation du puits d’essai

Le puits :

- Paroi moulée d’épaisseur : 80cm
- Diamètre intérieur du puits : 7m50
- Terrassement : -21m/TA
- Fiche mécanique : -26 m/TA
- Jupe injectée de 3m d’épaisseur : -41m/TA
  (ancrage de 1m dans le CG)
- 2 galeries d’essai situées 7m sous la nappe par rapport à la clé de voute

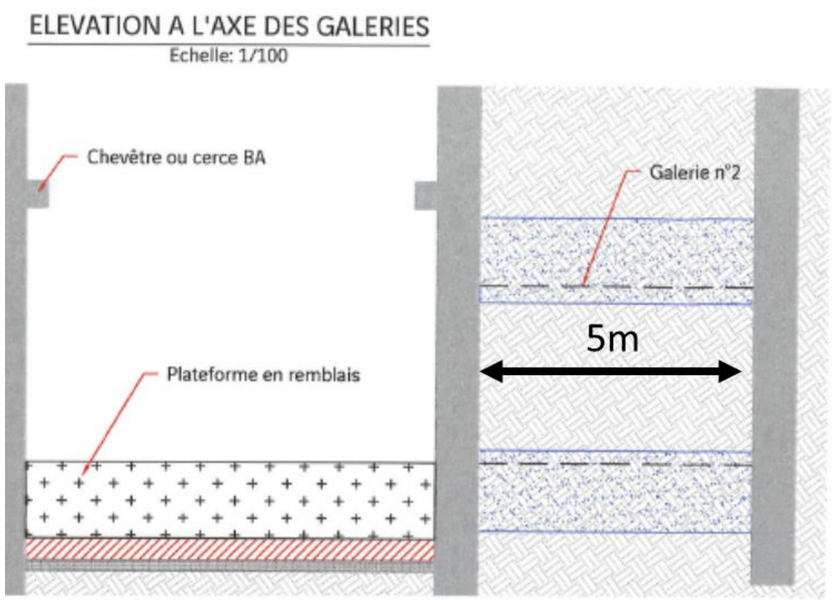


Coupe schématique du puits d’essai

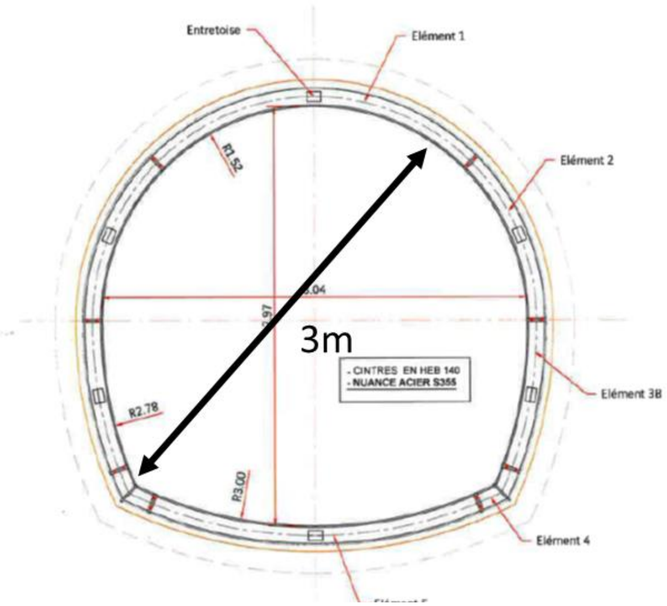
Présentation du puits d’essai

La galerie :

- Galerie d’essais en forme de fer à cheval d’une longueur de 5m et de 3m de diamètre
- Dimensions caractéristiques rameaux L16
- Fermeture par un tympan en paroi moulée
- Creusement en traditionnel à l’abri de cintres métalliques tous les mètres jusqu’au tympan.



Coupe longitudinale de la galerie congelée

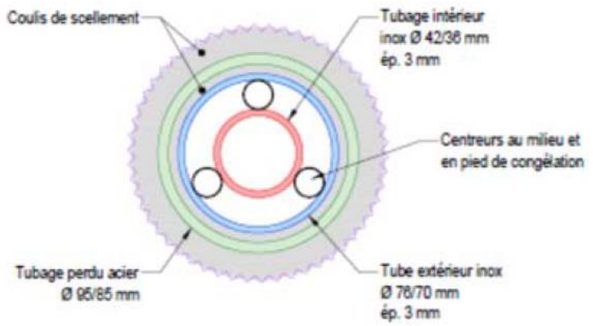


Coupe transversale de la galerie congelée

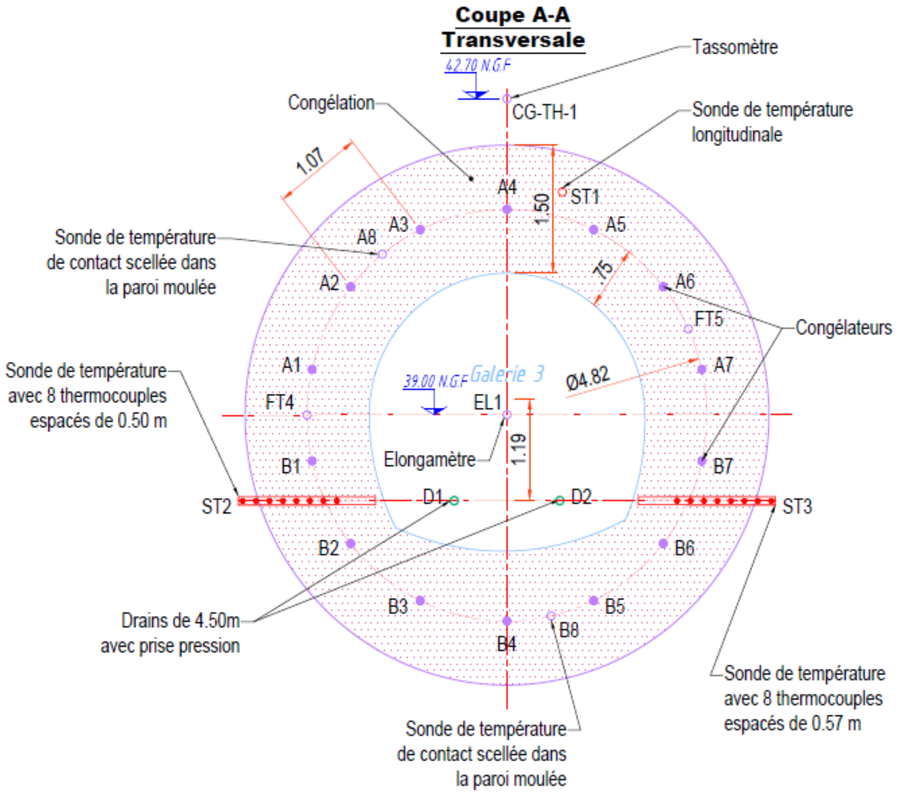
Présentation du puits d'essai

Le dispositif de congélation :

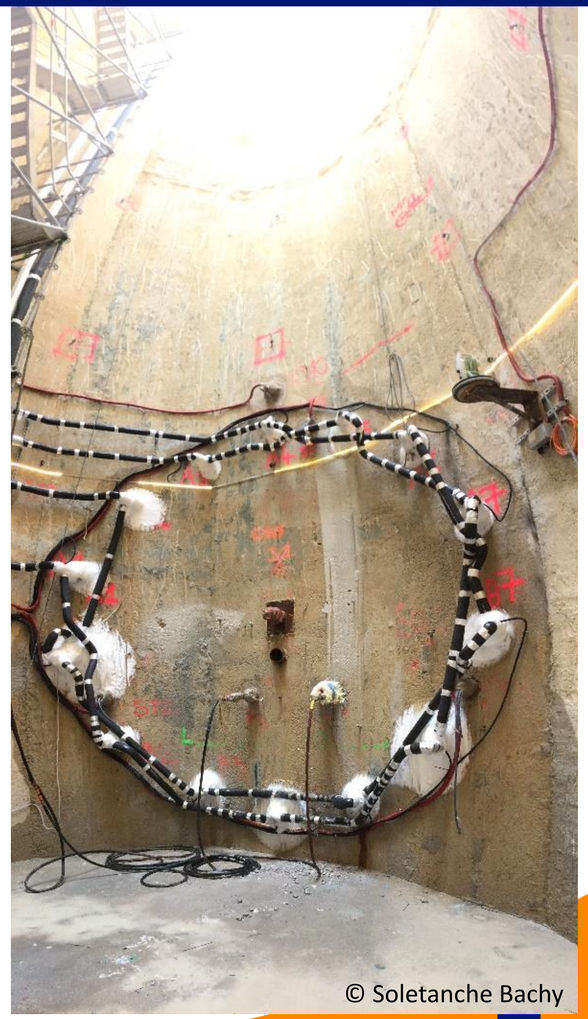
- 14 congélateurs forés sous SAS – Longueur 5-7m ;
- 1 seul anneau de congélateurs disposés à 75cm de l'excavation ;
- Matériaux (inox) et isolation adaptés aux températures cryogéniques.



Coupe de principe d'un congélateur



Coupe transversale du dispositif de congélation



© Soletanche Bachy

Présentation du puits d’essai

Un procédé de congélation mixte :

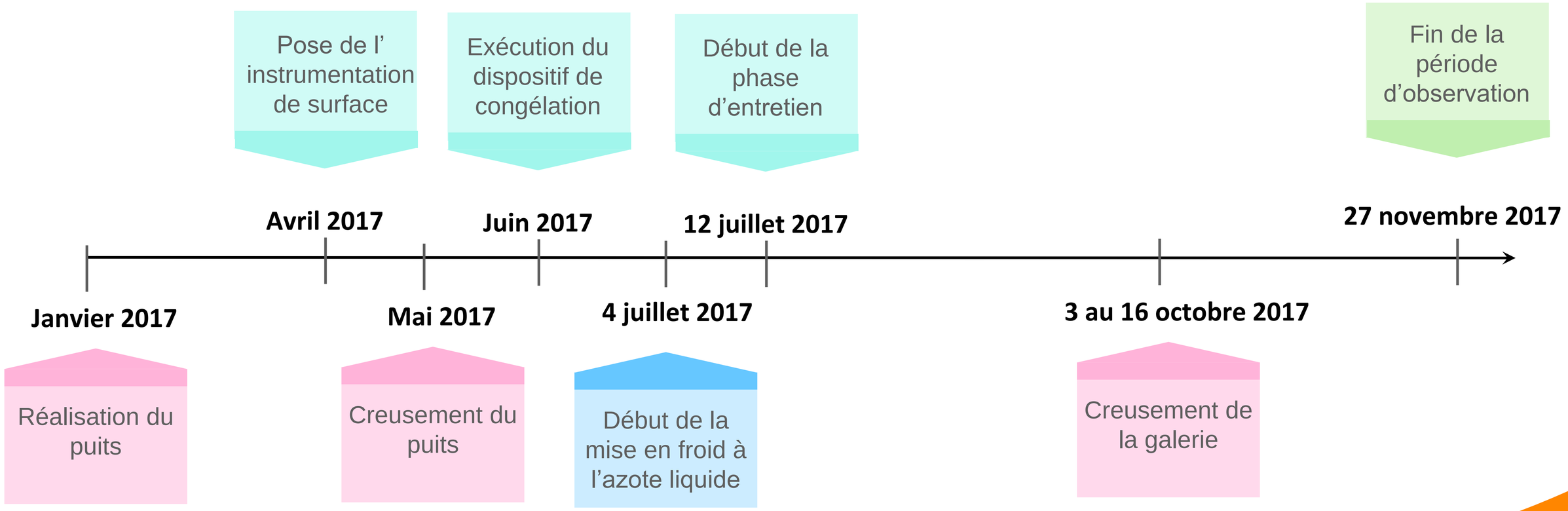
- Mise en froid à l’azote liquide ;
- Entretien du froid au Temper (fluide synthétique refroidi à T=-30°C par un groupe frigorifique).

© Soletanche Bachy

© Soletanche Bachy

Présentation du puits d'essai

La durée de l'expérience :



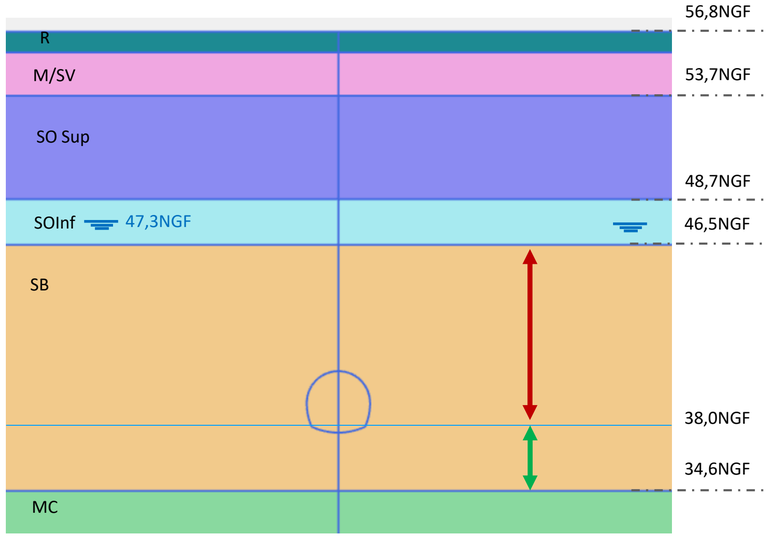
cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Reconnaissances préalables à la congélation

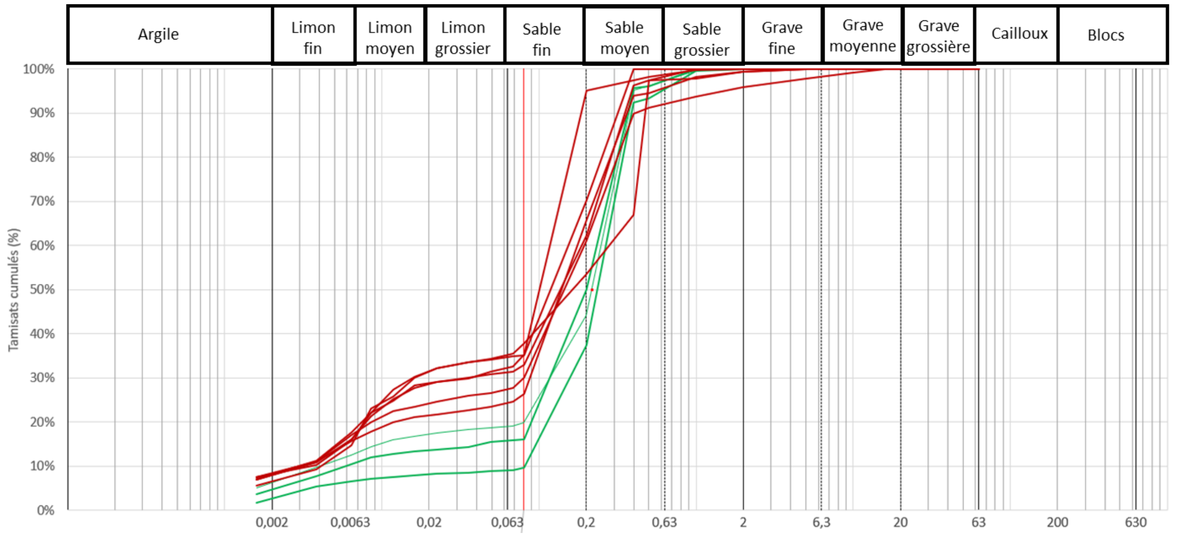
Reconnaissances préalables à la congélation

Caractéristiques initiales des Sables de Beauchamp

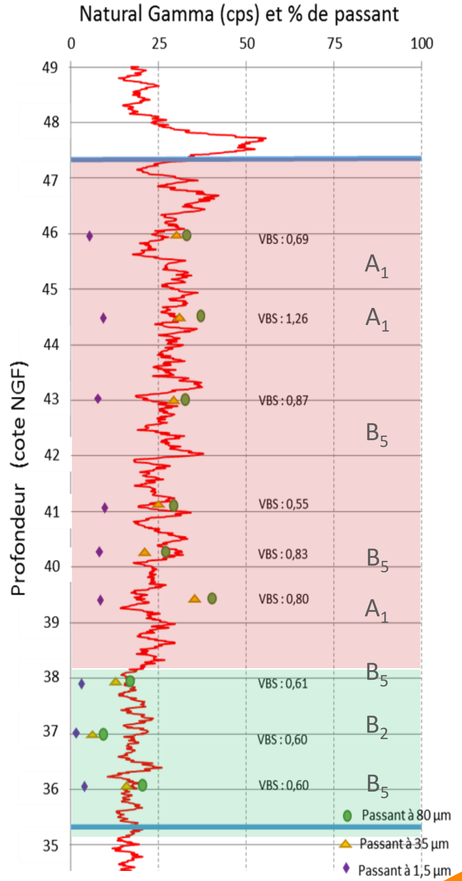
- 2 sondages carottés, 1 sondage pressiométrique et 1 essai cross-hole ;
- Sables de Beauchamp indifférenciés (absence d'écran médian) ;
- Sables fin limoneux grisâtre jusque vers 38 NGF (25 à 40% de fines) puis sables fin en deçà (<20% de fines) ;
- Absence de gypse (Gamma-Ray) et de blocs gréseux ou calcaires ;
- Sables mécaniquement denses et compacts : Pl*=5,8 MPa, E_M 79 MPa, G_{max} = 404 MPa



Stratigraphie du site d'étude



Fuseau granulométrique de la formation des Sables de Beauchamp



Diagraphie Gamma-ray

Reconnaissances préalables à la congélation

Essais sur sables de Beauchamp gelés

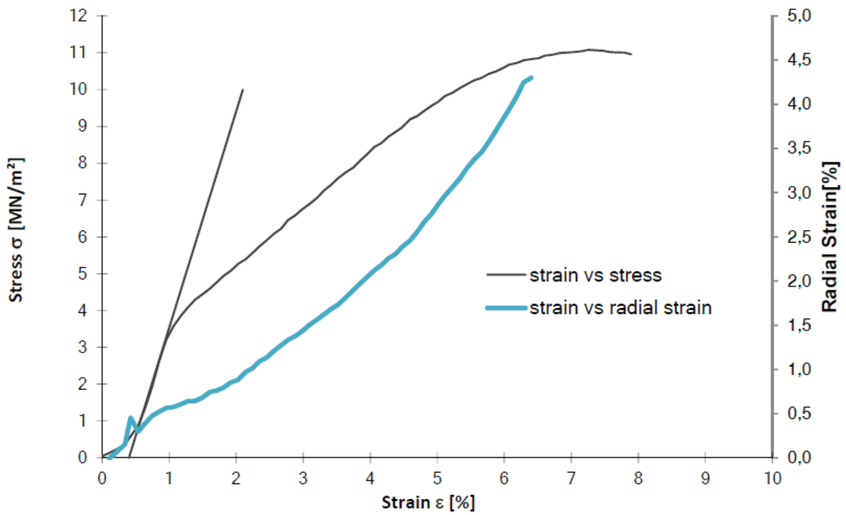
- **Réalisation de 2 campagnes d'essais :**

Essais sur sols congelés en laboratoire (chambre froide)

Essais sur sols congelés in-situ

Reconnaissances préalables à la congélation

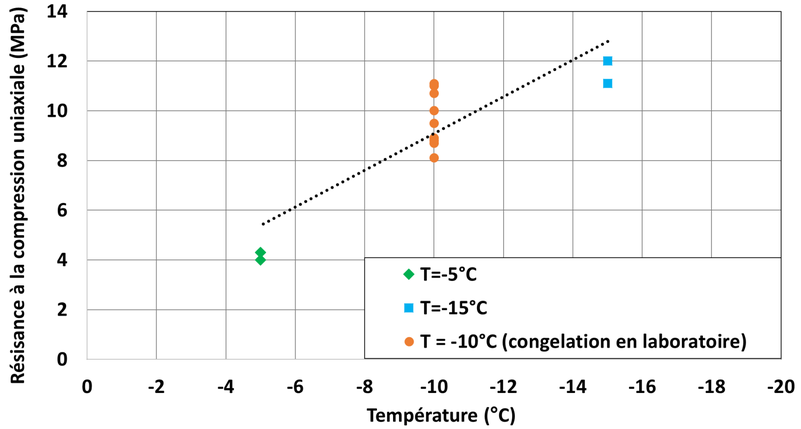
Essais de compression uniaxiale sur SB gelés :



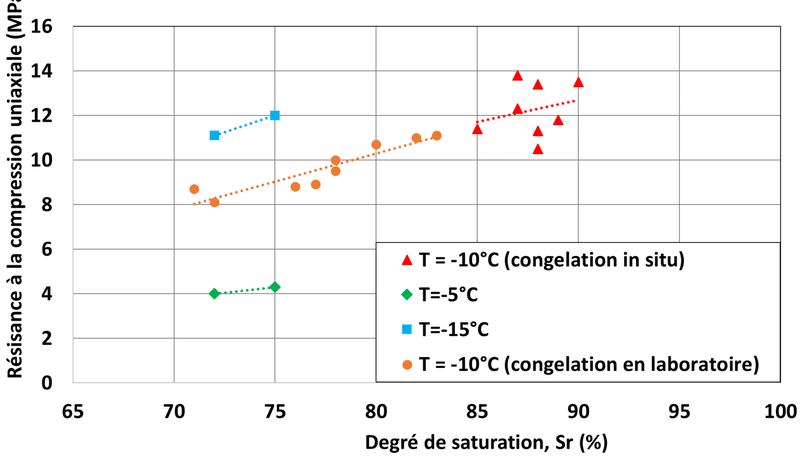
T (°C)	Nombre d'essai
-5°C	2
-10°C	17
-15°C	2

- Détermination de la résistance à la compression (y compris module) ;
- 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 (prélèvement in-situ à plus forte saturation).

Synthèse de la résistance à la compression selon la température



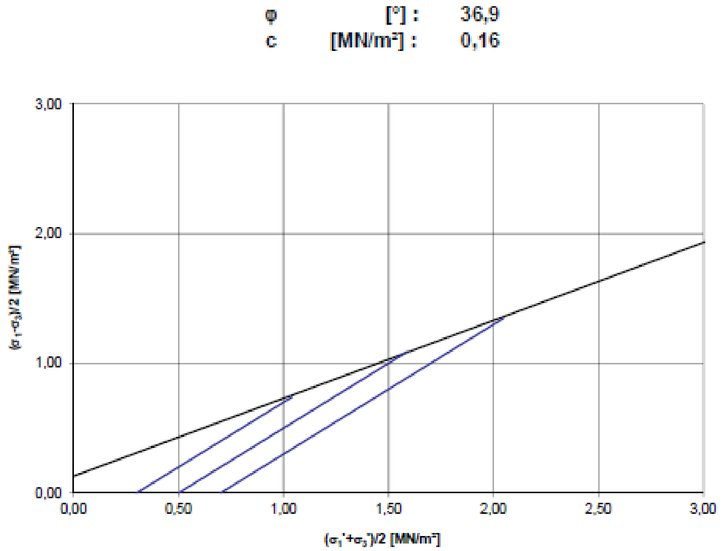
Synthèse de la résistance à la compression selon le degré de saturation

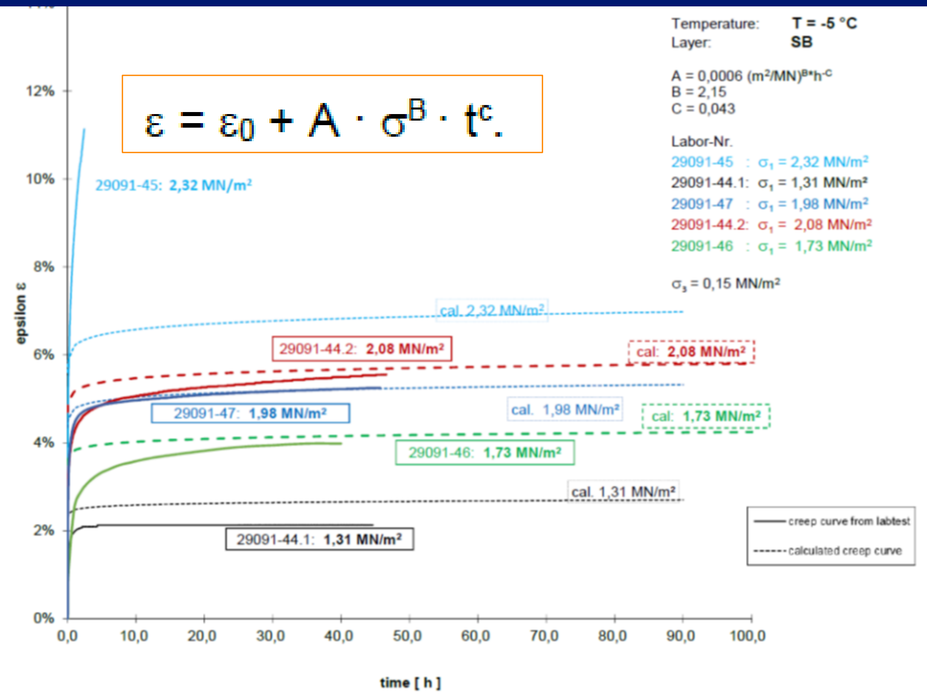


Reconnaissances préalables à la congélation

Essais de fluage uniaxial ou triaxial :

© CDM Smith



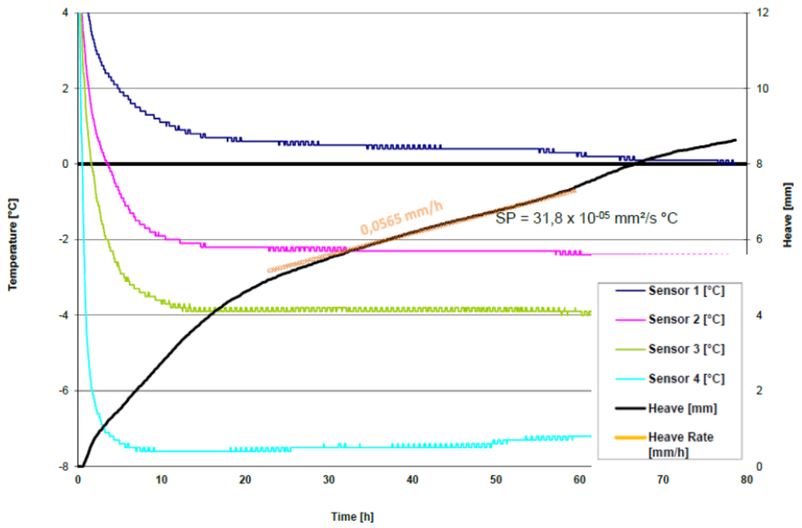


- Détermination de la résistance au cisaillement et des paramètres de la loi de Klein ;
- Résultats similaires en conditions uniaxiales ou triaxiales et pour différentes températures de congélation ;
- **Résistance au cisaillement accrue et aucun fluage significatif** des Sables de Beauchamp jusqu'à une contrainte de 2 MPa (*pour T=-5°C*) et 4MPa (*pour T=-10°C*).

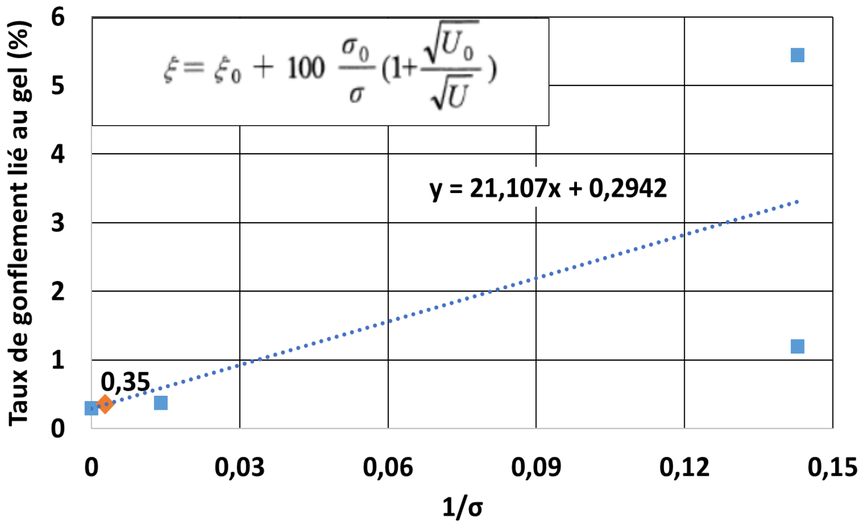
ESSAIS	température	-5°C	-10°C		
	échant. congelé	en labo	en labo	in situ	
fluage triaxial	A (m²/MN)².h^{-C}	0,0006	0,00089	0,00239	
	B	2,15	2,15	1,21	2,15
	C	0,043	0,043	0,076	
fluage uniaxial	A (m²/MN)².h^{-C}		0,00089	0,00089	0,00239
	B		3,17	3,17	1,62
	C		0,076	0,076	0,076

Reconnaissances préalables à la congélation

Mesure du potentiel de ségrégation et essai de gonflement lié au gel



Taux de gonflement lié au gel ξ (%) en fonction de l'inverse de la contrainte appliquée



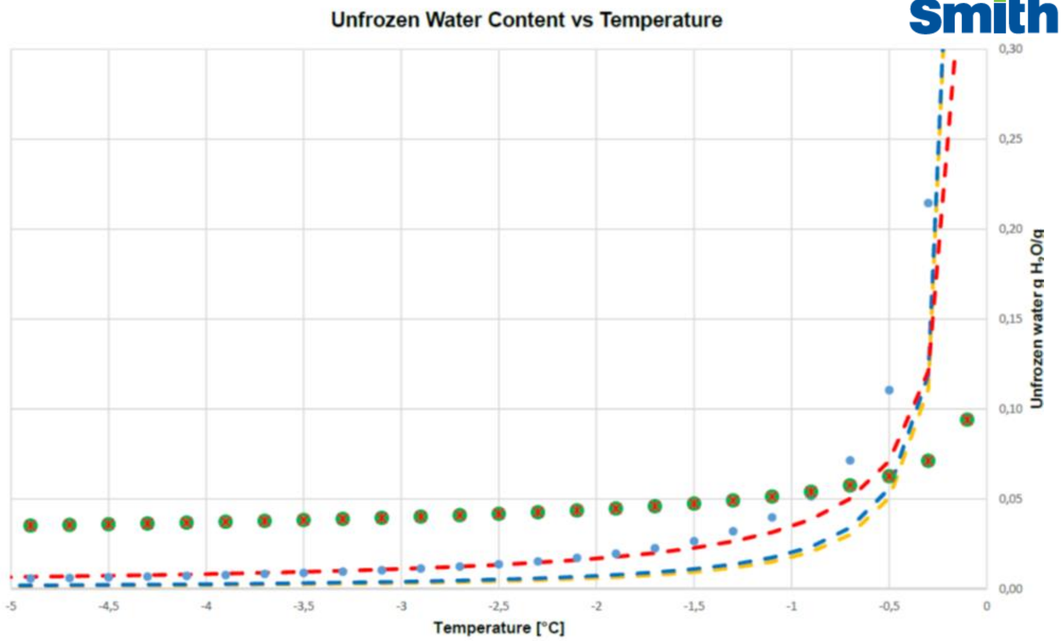
- Détermination du potentiel de ségrégation et de la pression de gonflement lié au gel ;
- **Faible potentiel de ségrégation** des Sables de Beauchamp et **faible taux de gonflement** liés au gel de l'ordre de 0,35% (*selon la contrainte à l'axe du tunnel*) ;
- Faible sensibilité à la formation de lentille de glace.

	heave rate	heave rate	Frost susceptibility
SP[mm²/s °C]	[mm/h]	[mm/day]	
2,29E-04	0,0565	1,4	Very Low
1,23E-04	0,0249	0,6	Negligible

Reconnaissances préalables à la congélation

Teneur en eau libre dans les sols gelés :

- La teneur en eau libre des sols gelés correspond à la proportion d'eau non gelée sous 0°C ;
- Cette quantité d'eau libre sous 0°C joue un rôle primordial dans le comportement des sols gelés et notamment en ce qui concerne la formation de lentilles de glace ;
- **Variations significatives observées**.



Représentation des différentes mesures effectuées de teneurs en eau libre (6 essais)

Teneur en sels dissous :

- Mesure de la salinité totale variant de 1,11 à 1,21 g/L et de la teneur en NaCl de 0,03g/L -> **pas d'incidence sur les calculs**

cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Description de l'auscultation

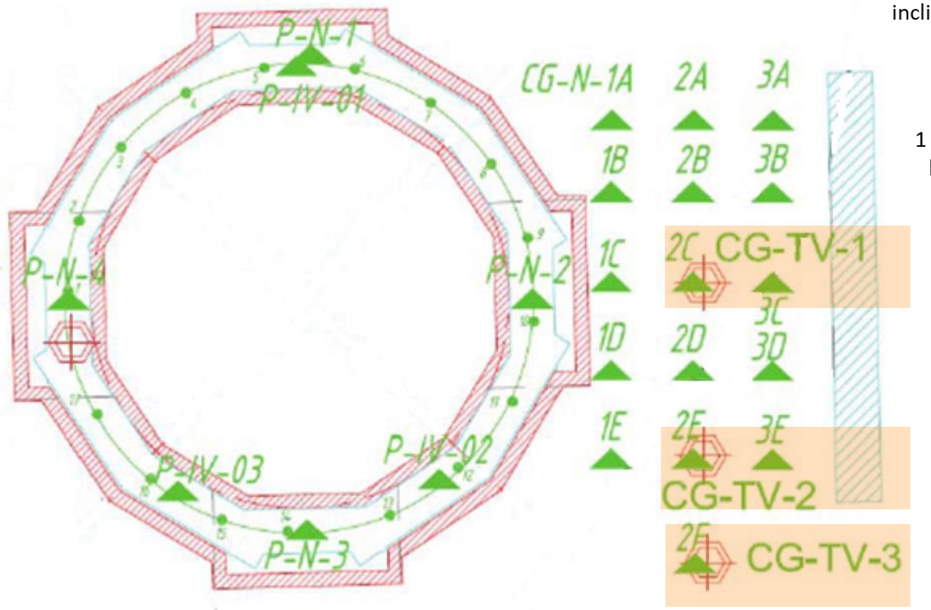
Description de l’auscultation

Un suivi des déplacements

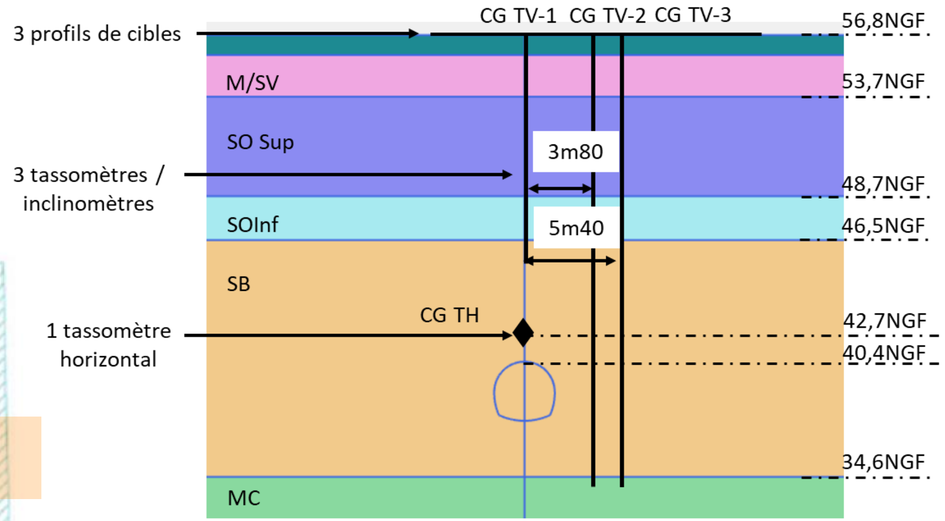
- 3 profils de 5 cibles topo en surface
- 3 tassomètres et inclinomètres verticaux (CG-TV)
- 1 inclinomètre horizontal (tassomètre, CG-TH)

Au droit de la galerie :

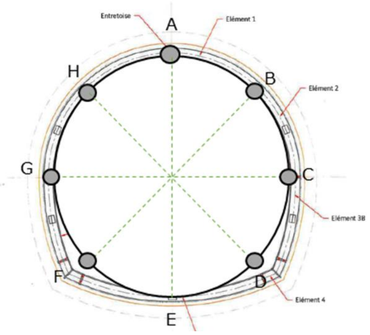
- 1 élongamètre (extrusomètre)
- 12 mesures de convergence des rameaux
- 10 cordes vibrantes



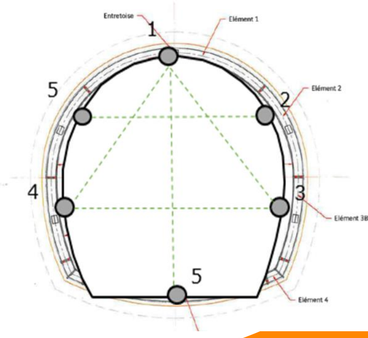
Vue en plan du dispositif d’auscultation des déplacements



Coupe du dispositif d’auscultation des déplacements



Mesures automatiques (cordes vibrantes)

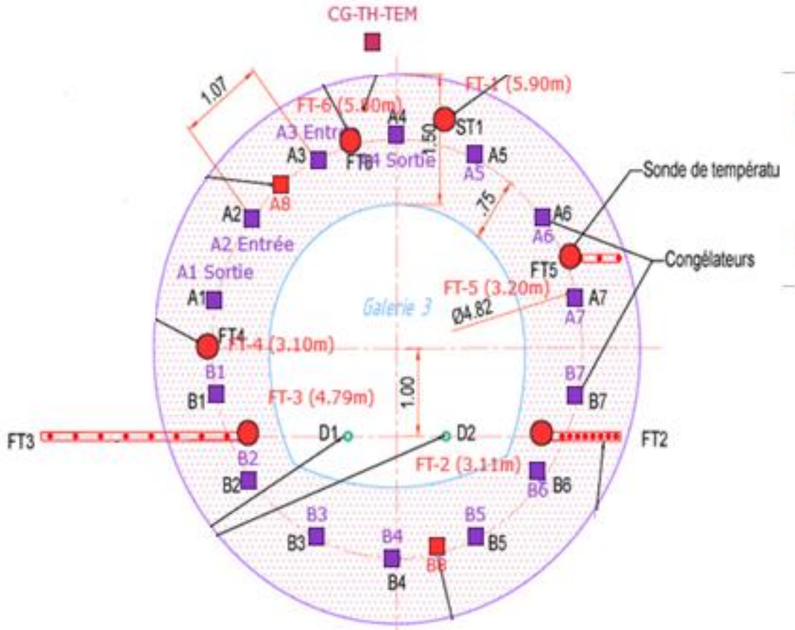


Mesures manuelles de distance

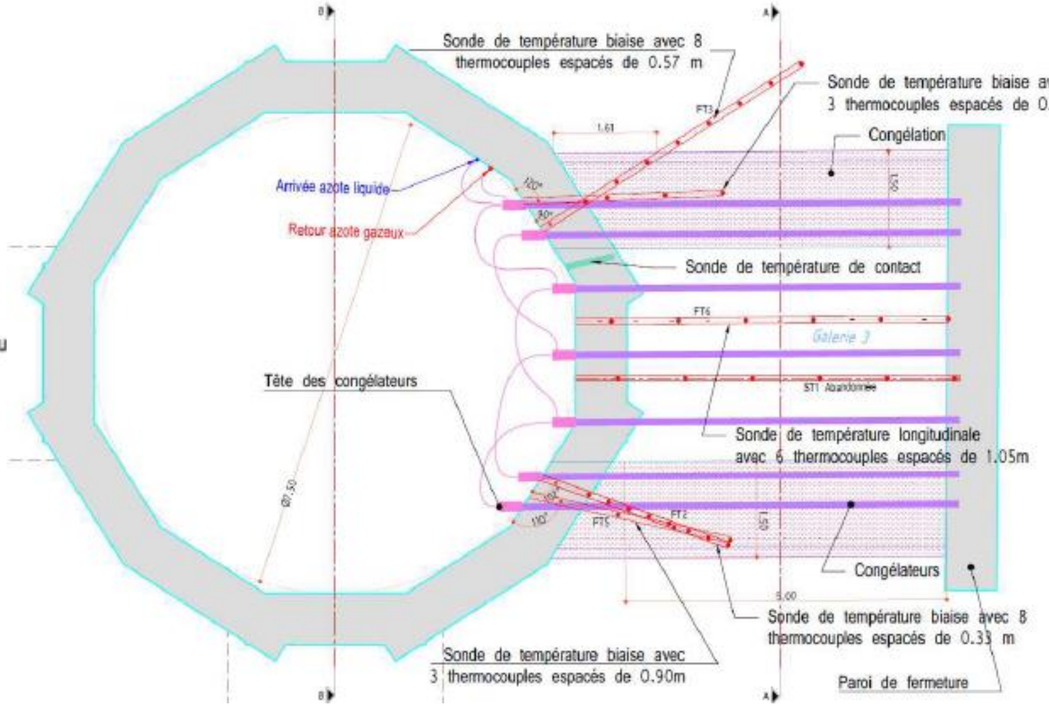
Description de l’auscultation

Un suivi des températures

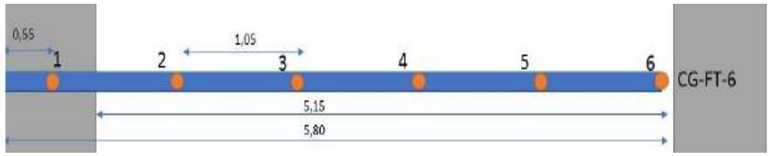
- **7 sondes thermiques** au droit de l’anneau de sols gelés (36 thermocouples) ;
- **Sondes longitudinales** : FT1, FT4, FT6 et CG-TH (tassomètre horizontal) ;
- **Sondes en biais** : FT2, FT3 et FT5 ;
- **Suivi en continu** via une plateforme dédiée aux membres du projet.



Coupe transversale du dispositif de congélation



Vue éclatée du dispositif de congélation



Position des thermocouples sur la sonde FT6

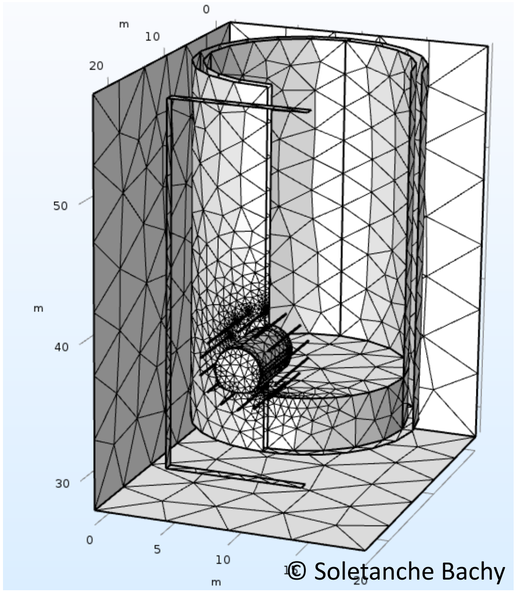
cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Modélisations numériques et calage des modèles

Modélisations numériques et calage des modèles

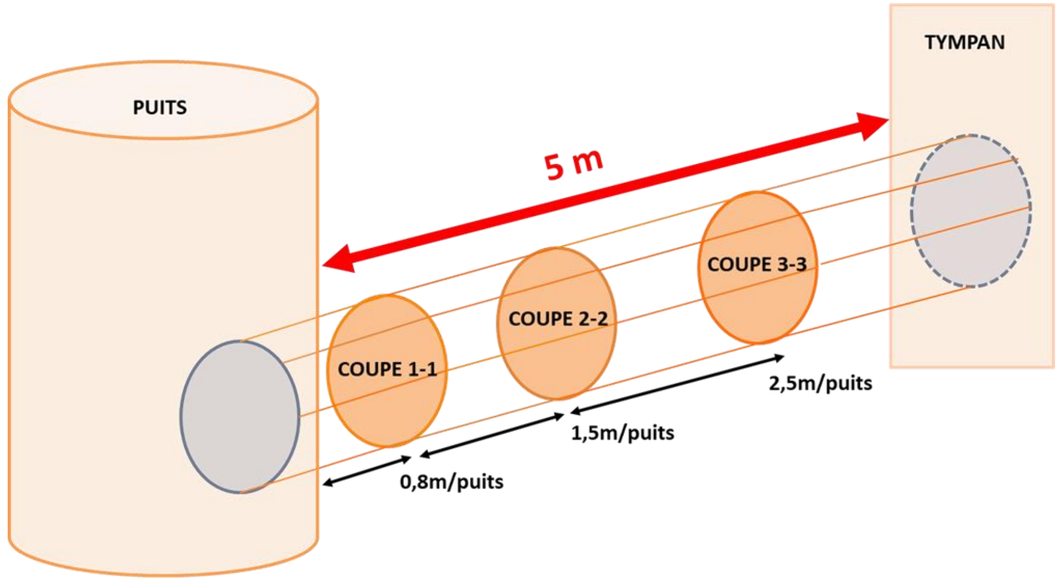
Définition du principe de calculs -> couplée ou découplée?

- La congélation est une méthode de traitement qui dépend de la thermodynamique, de l'hydraulique et qui influence la mécanique des sols traités ;
- Après comparaison avec un modèle couplé en 3D sous COMSOL, il a été retenu une **approche de calculs découplée** : modèle thermique et modèle mécanique dissociés selon des coupes transversales en 2D sous PLAXIS (Plaxis module Thermal pour la congélation).



© Soletanche Bachy

Extrait du modèle COMSOL

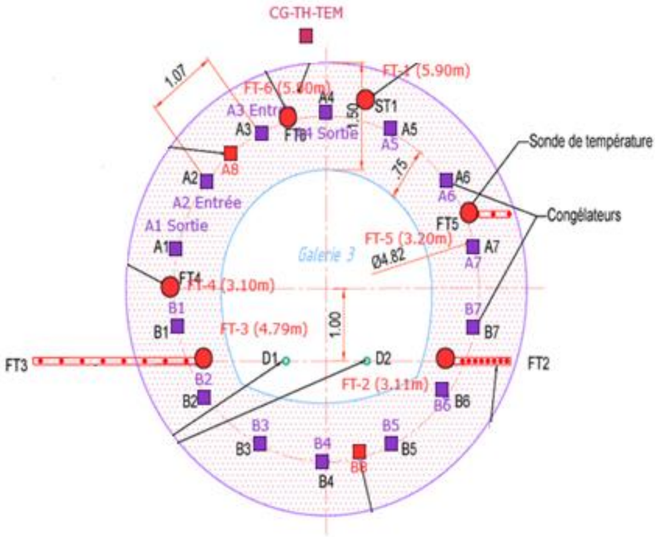


Vue schématique du principe de calcul retenu en coupes transversales

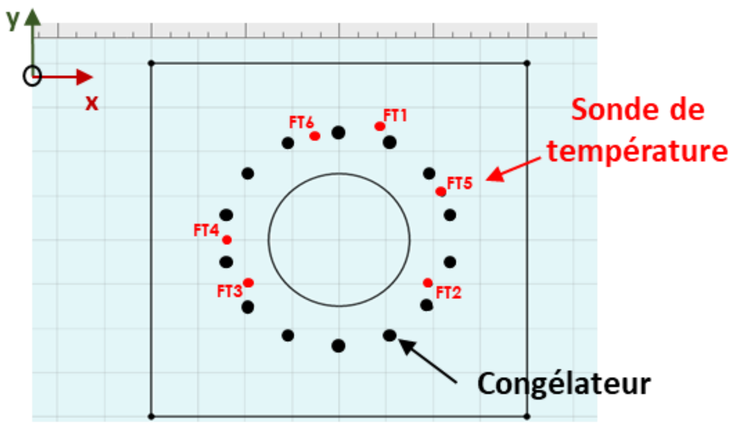
Modélisations numériques et calage des modèles

Modélisation thermique - Congélateurs

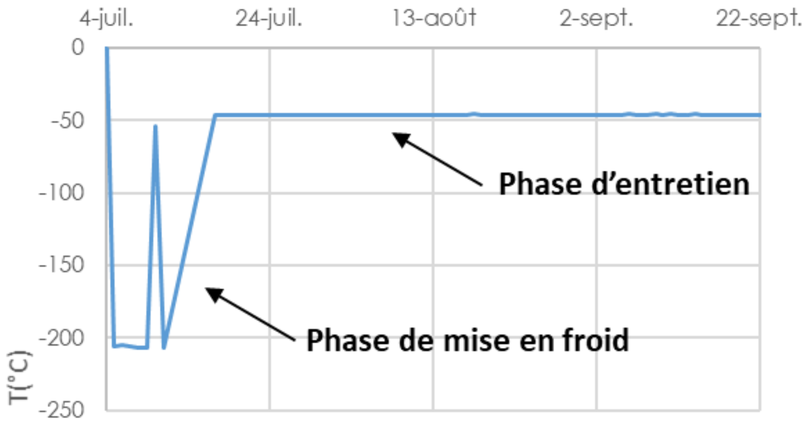
- Introduction dans le modèle des températures enregistrées jour par jour par l'auscultation au sein des congélateurs comme des **points de température imposée**.



Coupe transversale du dispositif de congélation



Extrait du modèle EF thermique



Relevé de température au droit du congélateur A7

Modélisations numériques et calage des modèles

Modélisation thermique – Conditions aux limites

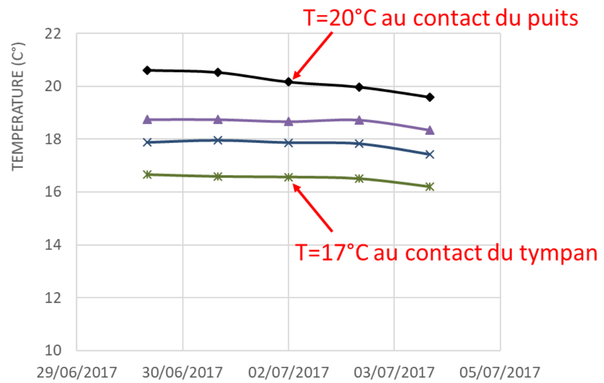
Conditions hydrauliques :

- Niveau statique de la nappe retenu à la cote EB (47,3NGF) ;
- Faible gradient d'écoulement de la nappe au sein des Sables de Beauchamp (0,4%) ;
- Faible perméabilité mesurée de Sables de Beauchamp ($K<10^{-6}$ m/s)

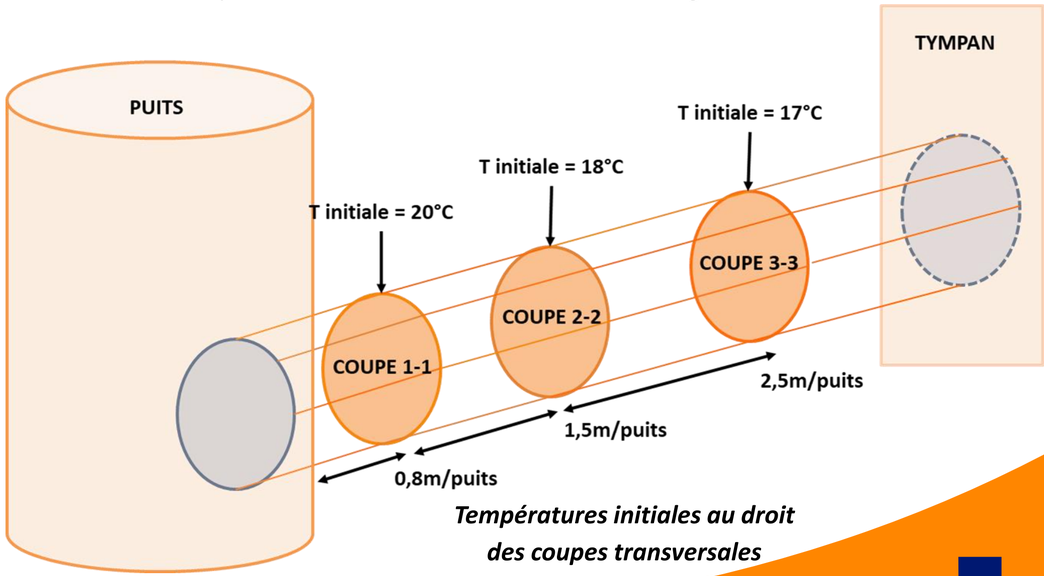
-> **absence d'écoulement modélisé au sein du modèle**
(vitesse d'écoulement faible au regard du temps de l'expérience)

Conditions initiales de température :

- Prise en compte des conditions de températures différentes au droit des 3 coupes afin de tenir compte du **gradient de température observé à l'état initial**.



Températures initiales au droit de la sonde longitudinale FT1



Températures initiales au droit des coupes transversales

Modélisations numériques et calage des modèles

Modélisation thermique – Les paramètres thermiques

- Modélisation de la diffusion du froid apportée par la congélation selon les lois de la thermique, dont les 2 paramètres principaux sont la **capacité thermique C** et la **conductivité thermique λ ;**

- Définition de la capacité thermique C et la conductivité thermique λ en fonction de la **proportion des différents composants du sol** identifiée en laboratoire.

-> Obtention des plages de variation des paramètres physiques et thermiques à prendre en compte dans le cadre du retro-calage

	Symbole	Unité	Mini	Maxi
Porosité mesurée	n	-	0,32	0,39
Saturation	S	%	70	100
Masse volumique sèche	ρ_d	g/cm^3	1,63	1,90
Capacité thermique volumique (SB non gelé)	C	kJ/m^3/K	2120	3350
Conductivité thermique (SB non gelé)	λ	W/m/K	2,67	2,98

- Ces valeurs évoluent ensuite dans les calculs selon la diminution de température et la formation de glace :

- Les variations de teneur en eau libre mesurées en laboratoire dans les sols gelés (W_u) sont également prises en compte.

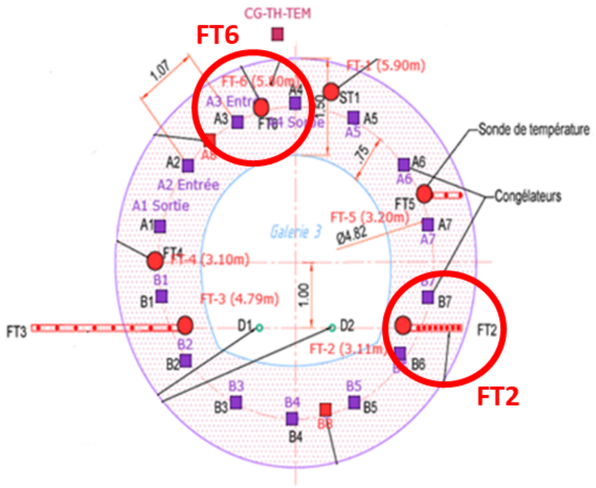
$$\rho C = (1-n)\rho_s C_s + \quad + nS\rho_w\left(C_w + l\frac{dw_u}{dT}\right) \quad + n(1-S)\rho_v C_v$$

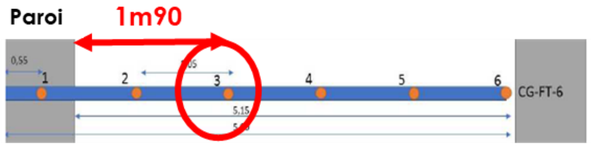
$$\lambda = (1-n)\lambda_s \quad + nS[w_u\lambda_w + (1-w_u)\lambda_i] \quad + n(1-S)\lambda_g$$

solide | liquide | glace | gaz

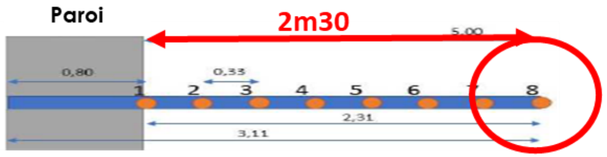
Modélisations numériques et calage des modèles

Modélisation thermique – Exemples de retro-calage

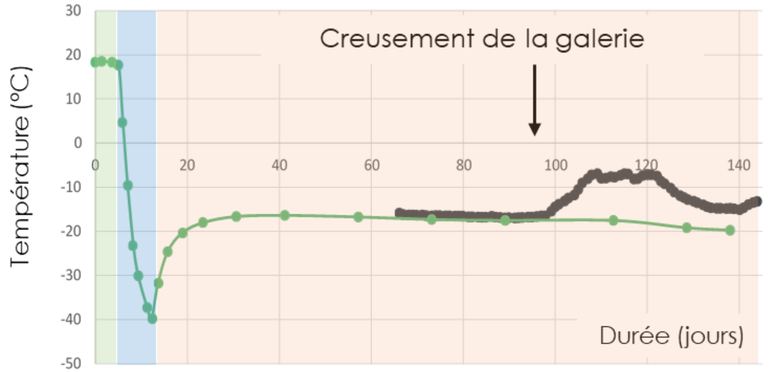




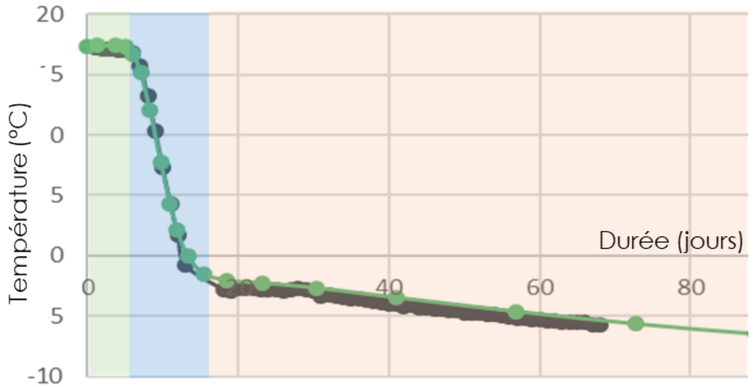
Position du point de mesure en FT6-3



Position du point de mesure FT2-8



Analyse comparative de retro-calage en FT6-3



Analyse comparative de retro-calage en 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

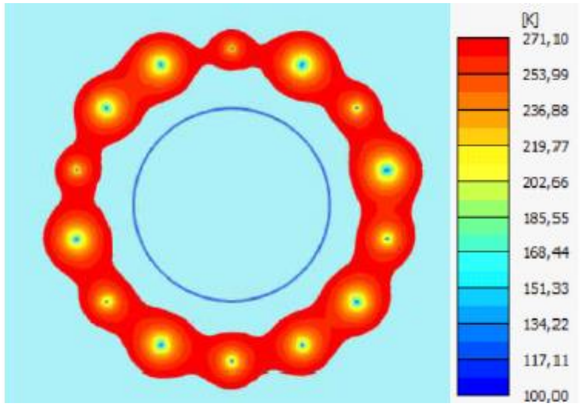
Modélisations numériques et calage des modèles

Modélisation thermique – Principaux résultats

- Détermination des **paramètres de dimensionnement** à l'issue des retro-analyses :

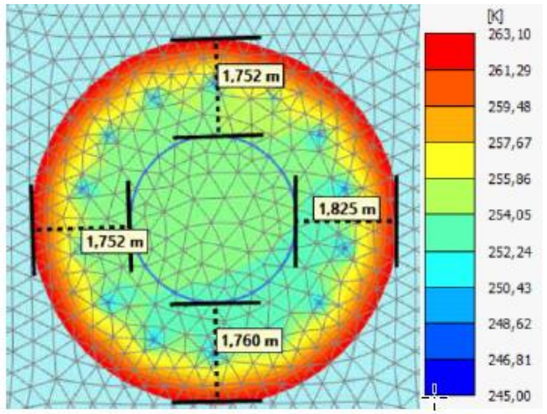
	Symbole	Unité	Valeur
Porosité	n	-	0,33
Indice de vide	e	-	0,5
Saturation	S	%	85
Poids volumique sec	ρ_d	g/cm^3	1,73
Capacité thermique volumique des SB non gelé	C	KJ/m^3/K	2 640
Conductivité thermique des SB non gelé	λ	W/m/K	2,85

- Détermination du temps nécessaire à l'obtention du **critère d'étanchéité** autour de la future galerie excavée (t=2 jours) :



Continuité de l'isotherme -2°C
(extrait MEF thermique)

- Evaluation de l'épaisseur de l'anneau de glace formé : validation **du critère d'épaisseur mécanique** (épaisseur minimale de 1m50 sous -10°C) :



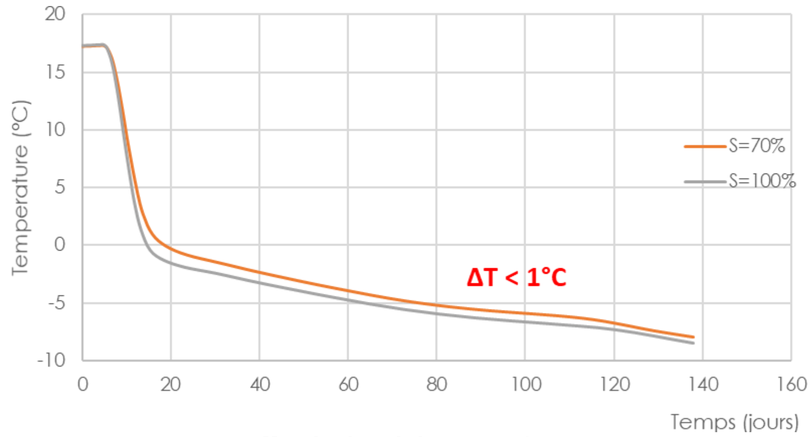
Coupe anneau SB gelés à T<-10°C
(extrait MEF thermique)

Modélisations numériques et calage des modèles

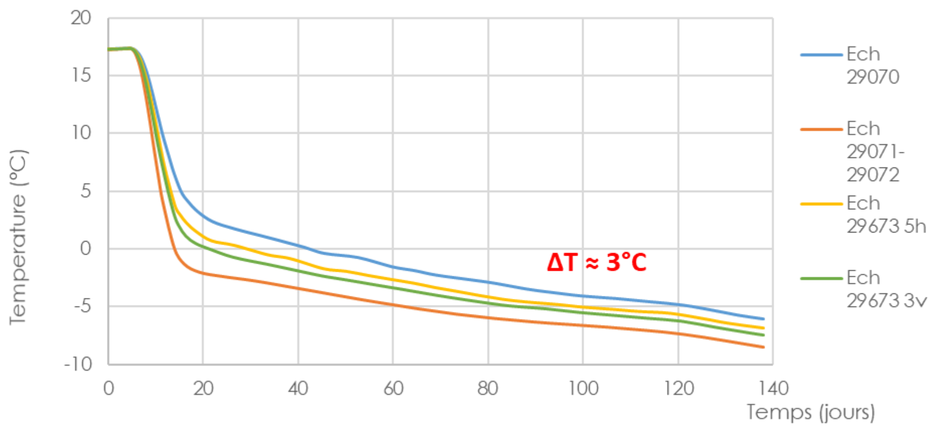
Modélisation thermique – Principaux résultats

- Réalisation d'études paramétriques sur la base des données de la ligne 16 :
  - Capacité thermique massique (1°C) ;
  - conductivité thermique (1°C) ;
  - degré de saturation (<1°C) ;
  - porosité (< 0.5°C) ;
  - masse volumique des grains (0.5°C) ;
  - **teneur en eau libre (écarts de 3°C).**

Paramètre thermique	Unité	Valeur minimale	Valeur maximale
Capacité thermique massique des grains (c_s)	(KJ/t/K)	700	840
Conductivité thermique des grains (λ_s)	(KW/m/K)	2,2E-03[(1)]	5,7E-03
Degré de saturation (S)		0,7	1
Porosité (n)		0,3 (0,15retenu[(2)])	0,39
Teneur en eau libre (Wu)		Plusieurs essais[(3)]	
Masse volumique des grains (ρs)	(t/m3)	2,64 (2,1 retenue)[(4)]	2,71



Effet du degré de saturation



Effet de la teneur en eau libre dans les sols gelés

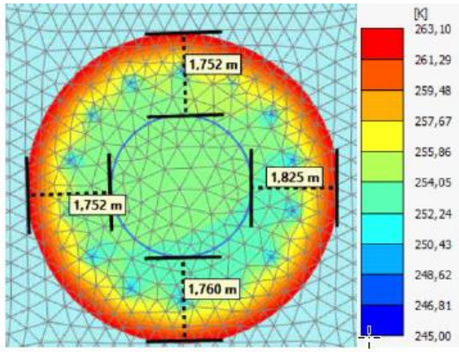
Modélisations numériques et calage des modèles

Modélisation thermique – vers la modélisation mécanique

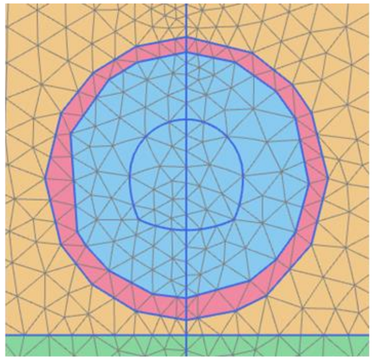
- Définition de la géométrie de l'anneau de congélation à partir des résultats du modèle thermique ;
- Prise en compte d'une loi comportement linéaire élastique avec un critère de rupture Mohr-Coulomb ;
- Détermination des paramètres de cette loi à partir des résultats des essais en laboratoire sur sols gelés (*résultats des essais de compression et de fluage pour T=-5°C et T=-10°C*) ;

Formation	Module d'Young E (MPa)	Coef de poisson v (MPa)	C' (kPa)	φ' (°)	ψ (°)
Sables de Beauchamp congelés à T=-10°C	175	0,3	470	28	0
Sables de Beauchamp congelés à T=-5°C	175(1)	0,3	180	28	0

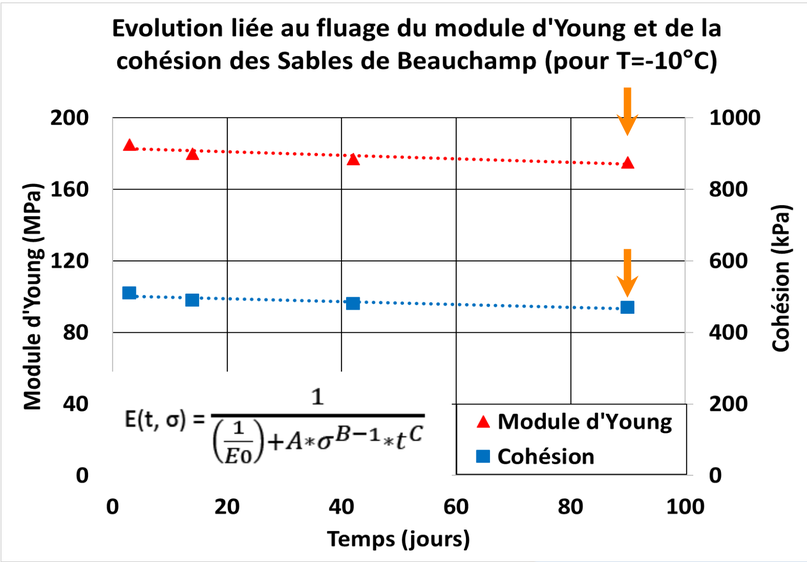
-> Choix des valeurs à t=3mois au regard de la faible sensibilité au fluage (*perte de l'ordre de 8% de la cohésion et de 5% du module d'élasticité*)



Coupe anneau SB gelés à T<-10°C (extrait MEF thermique)



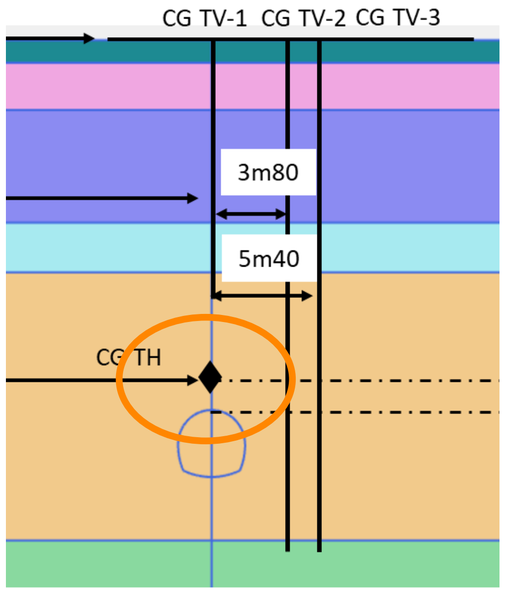
Coupe anneau de congélation T<-10°C en bleu, -5°C<T<-10°C en rose



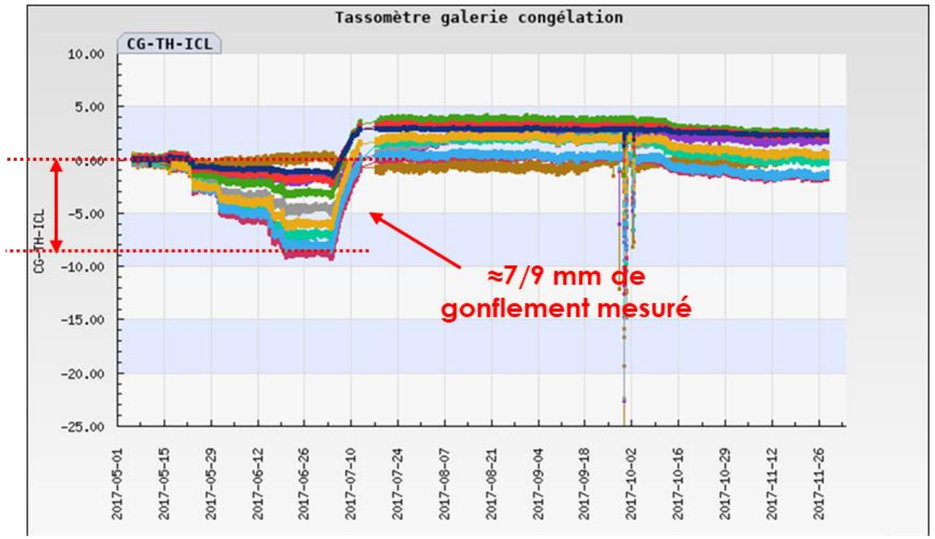
Modélisations numériques et calage des modèles

Modélisation mécanique – Retro-calage lors de la phase de mise en froid (gonflement)

- Observation d'un **gonflement** au droit du tassomètre horizontal à l'aplomb de la galerie -> reproduction dans le modèle numérique par l'application d'un **taux de déformation volumique** dans l'anneau de congélation proche du taux de gonflement mesuré en laboratoire.

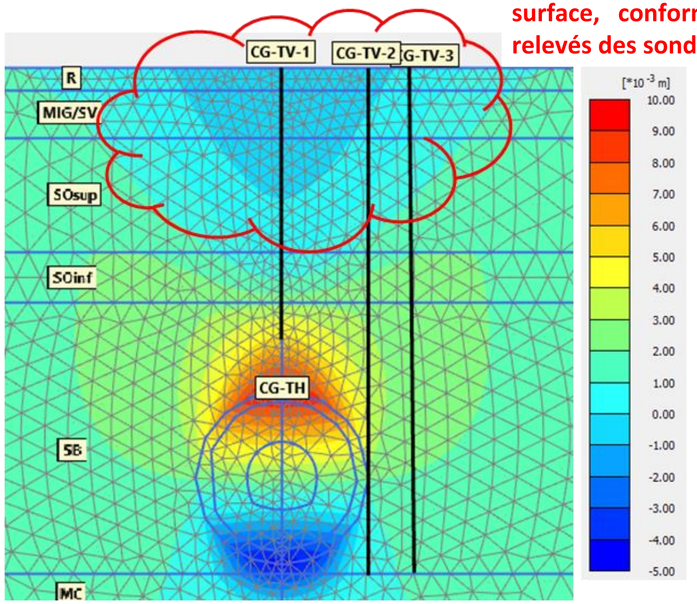


Emplacement du tassomètre horizontal



Relevé de déformations verticales au droit du tassomètre horizontal

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



Extrait des déformations verticales du modèle mécanique

Modélisations numériques et calage des modèles

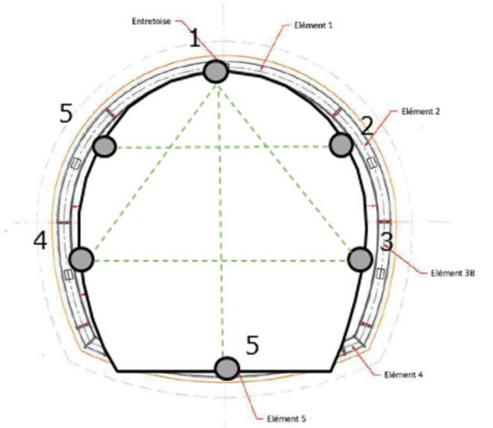
Modélisation mécanique – Principaux résultats

- Détermination des **paramètres de dimensionnement** à l'issue des retro-analyses :

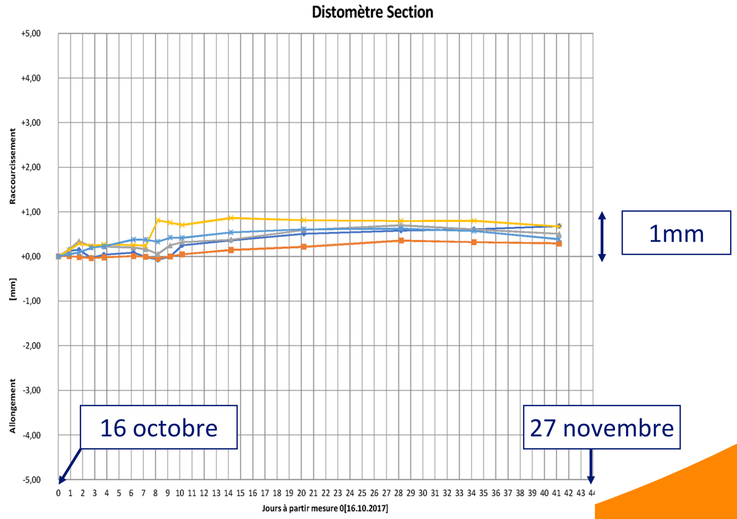
UCS (Mpa)	Contrainte admissible en compression avec prise en compte du				Module d'Young avec prise en compte du fluage			Paramètres de cisaillement	Cohésion avec prise en compte du fluage				Taux de gonflement lié au
σ_D	$\sigma_D(t)$ (MPa)				$E_g(t)$ (Mpa)			φ_g / c_g	$c_g(t)$ (Mpa)				%
	3jours	2 semaines	6 semaines	3 mois	2 semaines	6 semaines	3 mois	(°) / (MPa)	3jours	2 semaines	6 semaines	3 mois	
10,1	1,7	1,65	1,6	1,57	180	177	175	28 / 1,5	0,51	0,49	0,48	0,47	0,35

- Validation de **la faible sensibilité des Sables de Beauchamp au fluage** :

-> Déformations millimétriques mesurées lors de la phase d'observation (après excavation de la galerie)



Mesures manuelles de distance



Extrait relevé d'auscultation - Distomètre

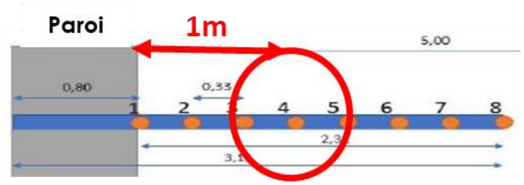
cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Difficultés rencontrées et solutions retenues

Difficultés rencontrées et solutions retenues

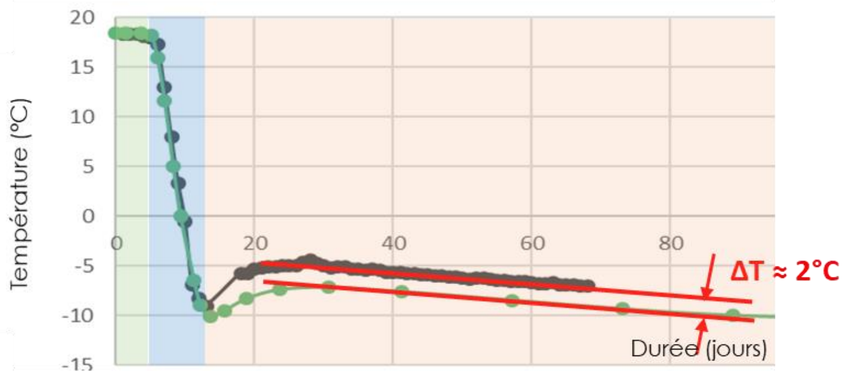
Mise en évidence d'un «effet de bord »

- Au démarrage de la phase d'entretien au temper, avant ouverture de la galerie, des gradients de températures importants ont été observés selon l'axe longitudinal de la galerie : caractérisation d'un «effet de bord » lié à l'apport de chaleur par le puits et sa ventilation.

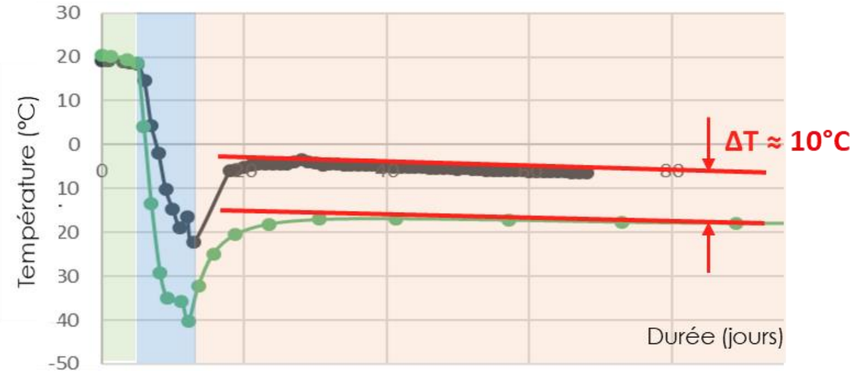


Position du point de mesure FT2-4

Position du point de mesure FT2-1



Analyse comparative de retro-calage en FT2-4

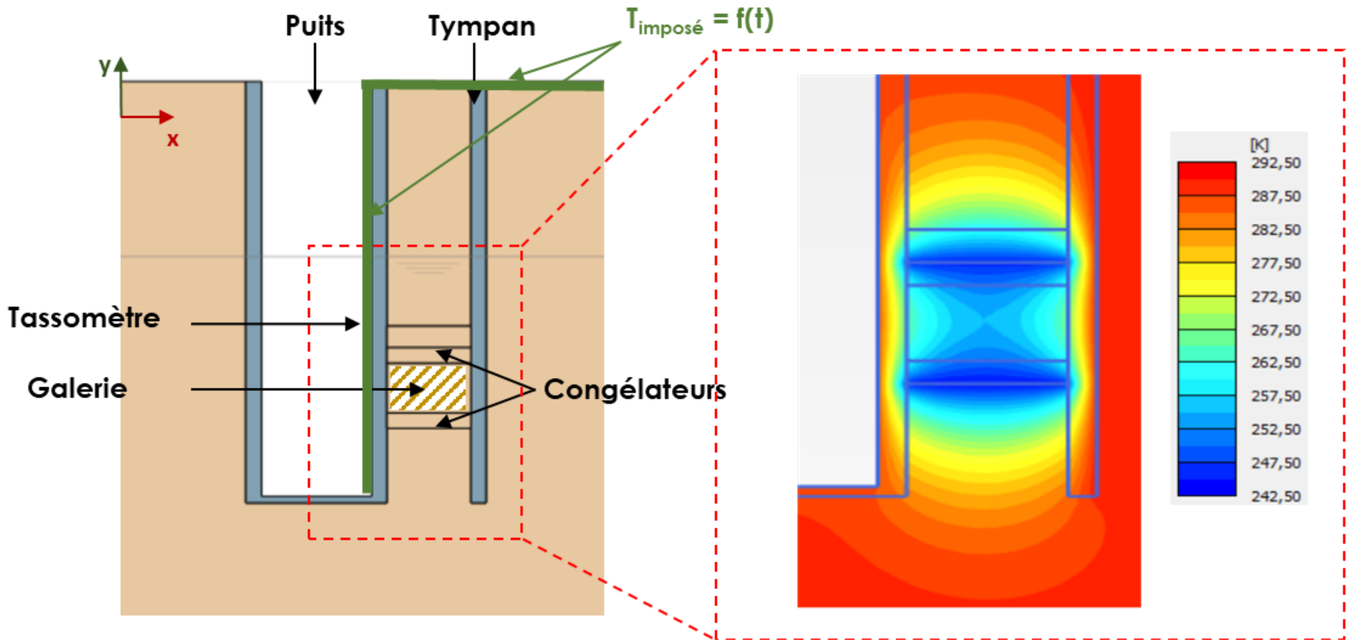


Analyse comparative de retro-calage en FT2-1

Difficultés rencontrées et solutions retenues

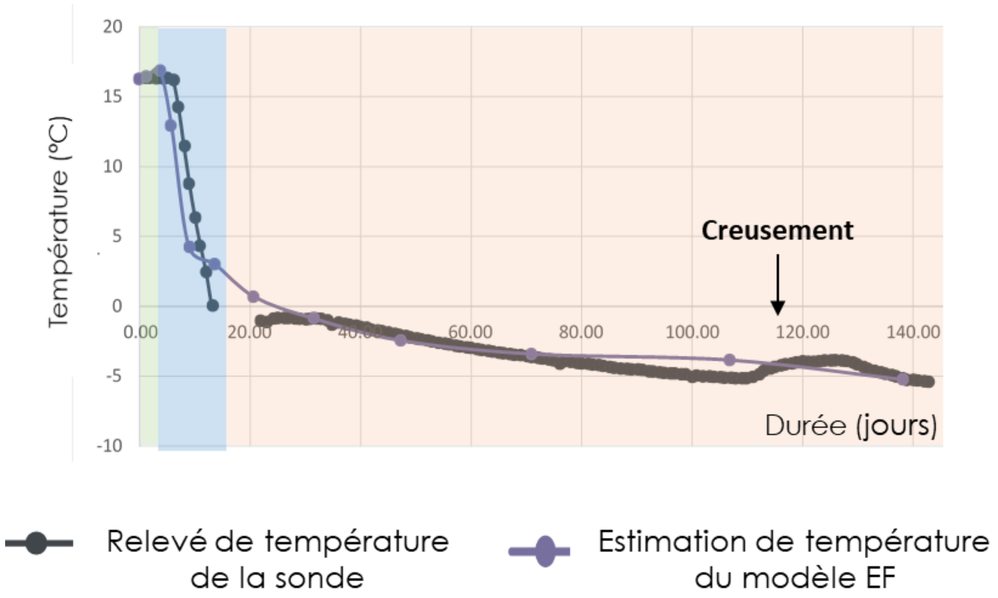
Modélisation thermique de « l'effet de bord »

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



Principe de calcul de la coupe longitudinale

Extrait des températures au droit de la galerie



Analyse comparative de retro-calage au droit du tassomètre

Difficultés rencontrées et solutions retenues

Solutions palliatives à « l'effet de bord »

- 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 à geler par les deux extrémités.
- La mise en évidence de ce phénomène a requis la **réalisation d'essais en laboratoire complémentaires** afin de vérifier la stabilité mécanique 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.

sas d'isolation thermique : bâche polyane et matériaux isolants sur le premier mètre de la galerie

cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Conclusions / Recommandations

Conclusions / Recommandations

Objectifs atteints :

- Meilleure connaissance du comportement des Sables de Beauchamp face au gel (fluage, gonflement) ;
- Détermination des paramètres de dimensionnement thermiques et mécaniques des Sables de Beauchamp liés à la congélation ;
- Identification des paramètres faibles et forts dans les mécanismes mis en jeu.

En termes de REX :

- Prévoir des sondes de température en excès (redondance des données, pannes) avec mesure indispensable des déviations des sondes et des congélateurs ;
- Réaliser des essais à différentes températures (majoritairement à -10°C mais aussi -15°C et -5°C) et anticiper la durée de réalisation des essais (2 à 4 mois) ;
- Privilégier des essais mécaniques sur sol congelé en laboratoire : approche sécuritaire vis-à-vis de la rupture par rapport aux essais menés sur échantillons de sol congelé in-situ ;
- Tassomètre horizontal : mesures intéressantes (y. c. température) ;
- Attention aux apports de chaleur parasites !

© Soletanche Bachy

Merci pour votre attention

Merci à la SGP, à Alexandre GIROUX d'EGIS et
à Basile LECONTE de SOLETANCHE BACHY

Annexe

Revue de presse et publications :

- 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.
- Giroux A., Leconte B., Rot J. (2019) Ligne 16 : Puits d'essai d'Aulnay - Congélation et Jet Grouting, JST CFMS Grands Projets d'infrastructures en Région Parisienne du 21/03/2019
- Regazzoni P.l., Giroux A. Rot J., Leconte B. et Soyez L. (2020) Puits d'essai d'Aulnay sous Bois: Metro L16 étanchement des sols pour le creusement de galerie. JNGG2020.
- Kreziak C., Giroux A., Retour d'expérience de traitements d'étanchement sur le Grand Paris : Vision croisée MOA et MOE, JST CFMS Traitements et améliorations des sols du 05/04/2023

cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

FIN

CFMS SCIENTIFIC AND TECHNICAL DAY _ NOVEMBER 17TH 2023

GÉOTEC