

Traitements et améliorations des sols

REX L16 du GPE traitements de sols pour l'étanchement
Vision croisée Maitrise d'Ouvrage et Maitrise d'Œuvre

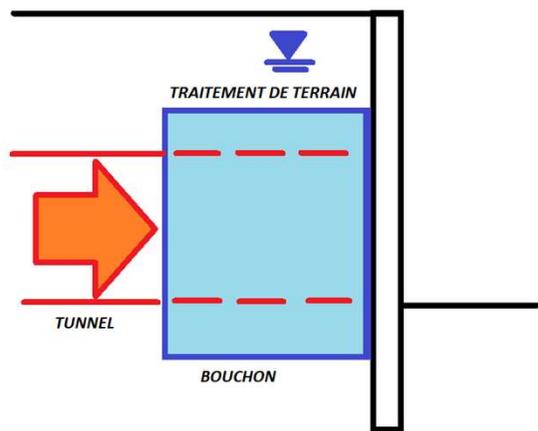
JST DU 05/04/2023

Alexandre GIROUX- EGIS

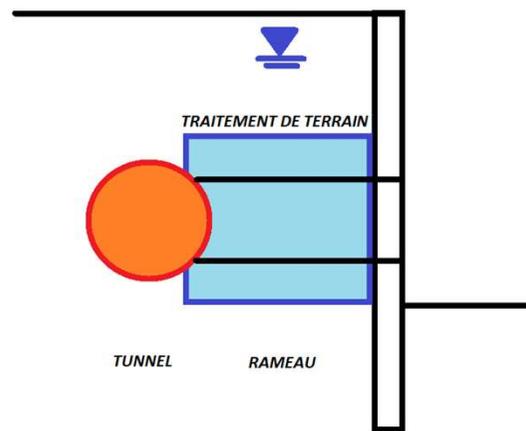
1- LES OBJECTIFS

▶ QUANTITE DES TRAITEMENTS DE TERRAIN

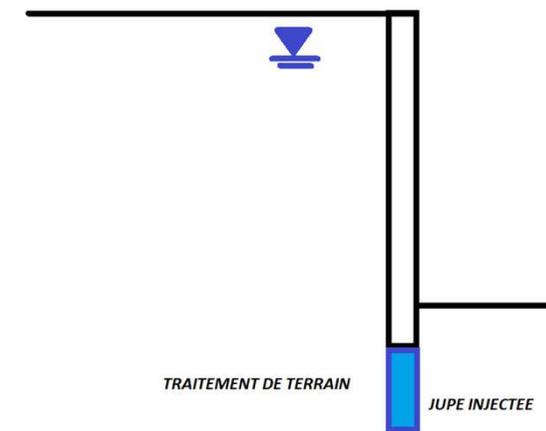
Ligne 16: 28 km de tunnels, 10 gares et 36 ouvrages annexes



30 bouchons 15 x 15 x 15m



26 rameaux de 4 à 23ml



22 jupes injectées
ancrées de 3m CG,
épaisseur 2 à 3m, h=5 à 21m/FM

1- LES OBJECTIFS

LE CONTEXTE GEOTECHNIQUE

Géologie :

- Calcaire de Saint Ouen (SO)
- Sables de Beauchamp (SB)
- Marnes et Caillasses (MC)
- Calcaire grossier (CG)

Hydrogéologie :

- Deux nappes : Bartonien et Lutétien
- Les ouvrages se situent sous de la nappe (20 à 30m de charge)

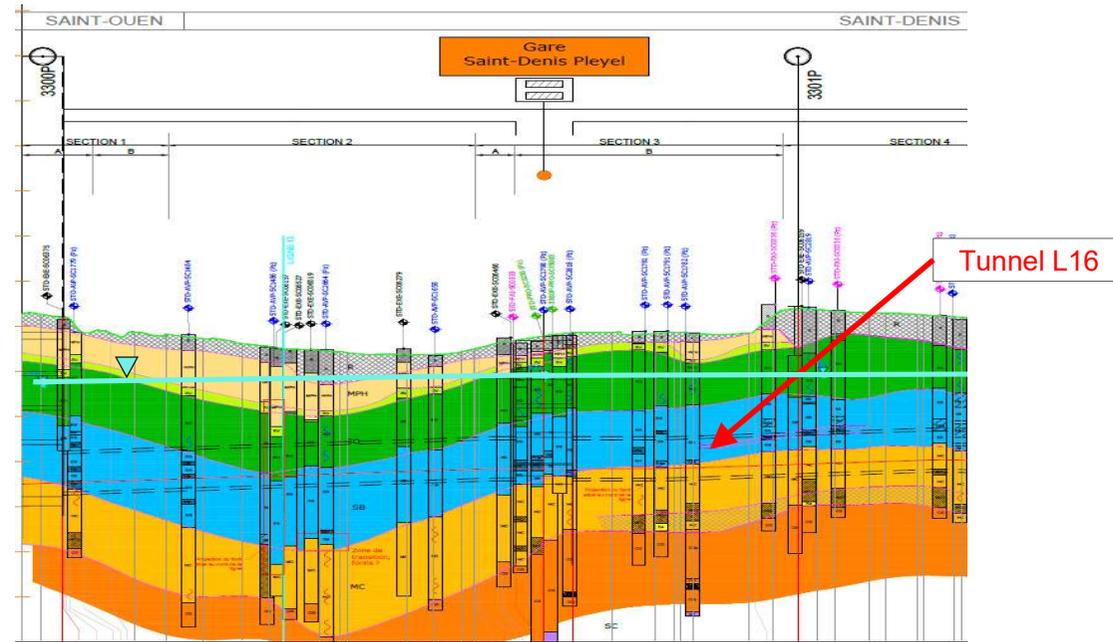


Tableau 1: Gammes de perméabilité des formations excavées

Formation	k_h (m/s)	k_v (m/s)
Calcaires de Saint-Ouen	$1 E^{-5}$ à $3 E^{-3}$	$2 E^{-6}$ à $3 E^{-3}$
Sables de Beauchamp	Sableux	$2 E^{-5}$ à $9 E^{-4}$
	Argileux	$1 E^{-8}$ à $1 E^{-7}$
Marnes et Caillasses	$5 E^{-5}$ à $5 E^{-4}$	$1 E^{-5}$ à $5 E^{-4}$

1- LES OBJECTIFS

➤ LA REDUCTION DE PERMEABILITE – MAITRISE DES VENUES D'EAU

Incertitudes liées aux techniques de traitement :

- Perméabilité des terrains
- Passages indurés
- limite stratigraphique (front mixte)
- Nature très fine des SB: Quelle technique de traitement?

Risques potentiels associés en cas de non maitrise des venues d'eau :

- Débouillage dans la formation des SB
- Tassements en surface
- Débit et volumes annuels supérieurs aux limites autorisées

2- LES TRAITEMENTS MIS EN OEUVRE

▶ LE Puits D'ESSAI D'AULNAY-SOUS-BOIS

Le puits d'essais d'Aulnay sous bois

- ▶ Puits de 7,5m de diamètre en Paroi moulée épaisseur : 800mm
- ▶ Traitements de sols dans les conditions réelles jet grouting et congélation
- ▶ 2 rameaux (5mx 3m x 3m)
- ▶ Reconnaissances géotechniques en terrain naturel et traité
- ▶ Auscultation de l'ouvrage en vue rétro-analyse

Points clefs

- ▶ présentation journée CFMS du 21/03/2019
- ▶ Reconnaissance détaillée de la stratigraphie (% fine, blocs rocheux, etc.)
- ▶ Plot d'essai avec mesure fiable du diamètre des colonnes
- ▶ Maitrise des déviations et géométrie (maille) des colonnes adaptée

Les limites

- ▶ Conditions relativement idéales pour ce puits d'essais
- ▶ Faciès sans inclusions rocheuses
- ▶ Interfaces avec SO et MC non testées



2- LES TRAITEMENTS MIS EN OEUVRE

LA REDUCTION DE PERMEABILITE – MAITRISE DES VENUES D'EAU

Jet grouting : dans les SB

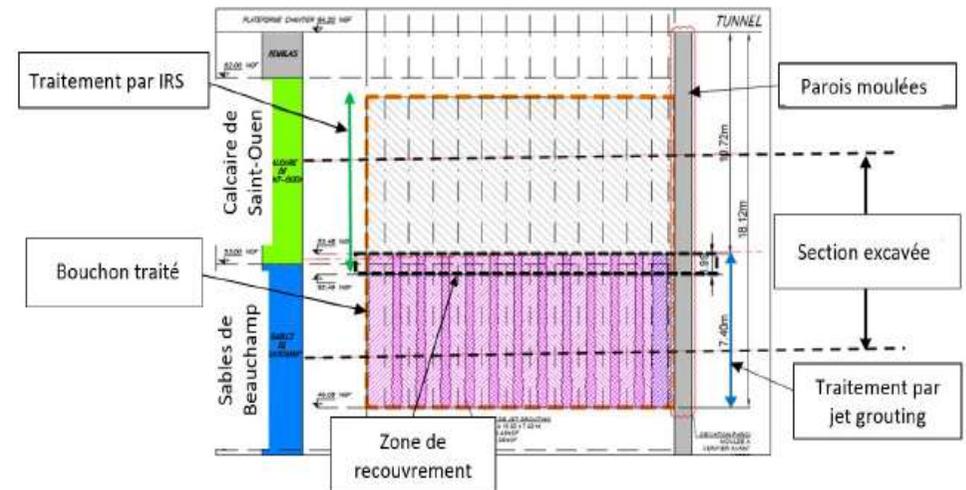
- Jet double
- Energie variable entre 60 et 90 MJ/ml
- Maillage triangulaire : 1,0 x 1,2 m
- Diamètre colonnes ~1,5m

IRS : dans les SO, MC et CG

- Pression d'injection max à 20 bars
- Maillage rectangulaire : 1,75 à 2,25 m

Imprégnation dans le CG altéré, SO et MC

- Pression d'injection max à 20 bars
- Maillage rectangulaire : 1,75 à 2,25 m



Coupe longitudinale d'un traitement mixte type

Ouvrage profonds :

Profondeur min : 20 m

Profondeur max : 45 à 50 m

2- LES TRAITEMENTS MIS EN OEUVRE

➤ LES TRAITEMENTS DE TERRAIN SUR LA LIGNE 16 (jet grouting)

Sous-traitant	1	2	3	4	5	6	7
Énergie MJ/m	80	72 et 78	74 et 90	84 et 153	69 et 82	72 et 88	78 et 93
Maille m	1	0.89 à 1.07	0.94 à 1.05	1.05	1.25	1.18	1.12
Diamètre m	1.5	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5	1.5

- Maillage très variable
- Bons résultats à partir de 84 MJ/m (diamètres de colonnes)
- Nombreuses reprises de colonnes (+73 pour un ouvrage)

3- LES CONTRÔLES

➤ LES CONTRÔLES DE SURFACE

Contrôle géométrique

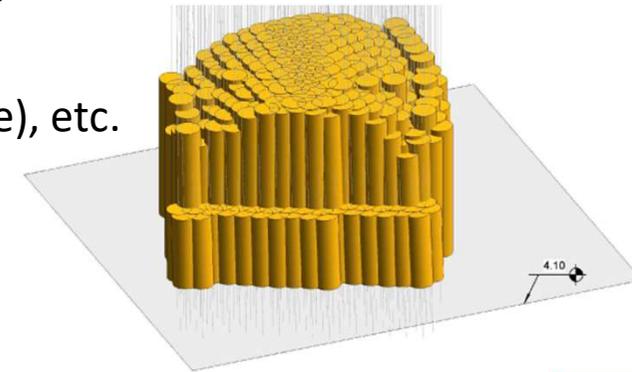
- Sondage carotté préliminaire: repérage fins des horizons indurés et limites front mixte
- Mesures de déviation: TRIGOR, Measurand (biaxial), inclinomètre
- Diamètre de colonnes de JG (5%) : cylindre électrique et Carottage au point triple
- Modèle 3D selon déviation des colonnes: Parfois plus de 10 colonnes de reprises sont réalisées

Contrôles mécaniques:

- Contrôles de coulis: viscosité, densité, Rc (convenance), etc.
- Echantillon sol traité: RC, E_{young} , poids volumique
- Contrôle de spoil (JG): densité

Contrôles de perméabilités

- Essais Lefranc ou Lugeon: k $5^E-7m/S$ respectée



Représentation 3D des colonnes selon déviation

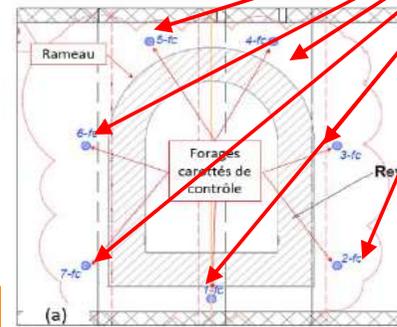
3- LES CONTRÔLES

➡ LES CONTRÔLES AVANT L'OUVERTURE DU RAMEAU

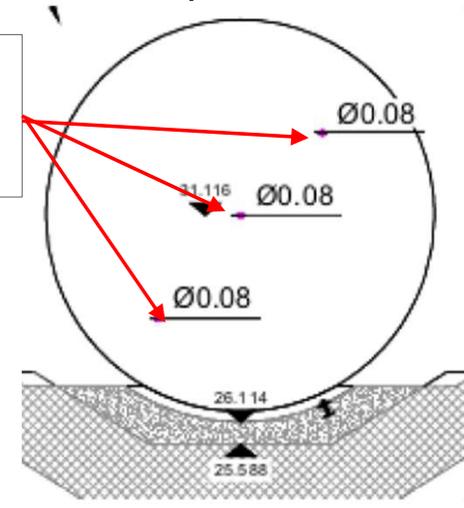
- Carottages sous SAS:
- Drains:
 - Densité
 - Profondeur
 - Diamètre
 - Durée d'ouverture

efficacité du traitement, passages indurés
venues d'eau $Q = 0.3$ ou $10.8\text{m}^3/\text{h}$?
minimale ? Selon contrôle cylindre électrique?

40, 50, 80, 120mm...



Forages carottés de contrôle



4- LES ADAPTATIONS EN COURS DE TRAVAUX

▶ LES ADAPTATIONS EN COURS DE TRAITEMENT

Risque	Cause	Mesure préventive	Mesure corrective
Traitement peu performant	Déviations des forages	Resserrement du maillage Tige rigide Déviations marché 0.5%	Modélisation 3D & colonnes de reprise
	Mauvais développement des colonnes	Réalisation d'un plot d'essai Reconnaissance fine des terrains Mesures de diamètre à l'avancement	Modélisation 3D avec diamètre non uniforme sur hauteur
Impact sur les ouvrages et les avoisinants	Mauvaise remontée spoil	Forage gros diamètre Surveillance remontée	Percement de la dalle Évents et lavage régulier
	Phasage à risque (paroi terrassée)	Surveillance topo ou inclinométrique	Forage gros diamètre et tubage des forages Réduction de l'énergie Modification du phasage de réalisation des colonnes
Débordements de spoil à l'extérieur du chantier	Mauvaise gestion des spoils	Modalités de confinement et de gestion du spoils à préciser en amont.	-

4- LES ADAPTATIONS EN COURS DE TRAVAUX

LES ADAPTATIONS EN COURS D'EXCAVATION

Risque	Cause	Mesure préventive	Mesure corrective
venues d'eau au percement	Zones indurées, Zones d'ombres	Reconnaissance fines des terrains Avec mesure de RC contrôles des diamètres Multiplier les forages horizontaux	Injection de résine ou de coulis de ciment
	Mauvais collage	Phasage adapté	Injections de collage depuis FF
Venues d'eau en cours de creusement: débouillage et ennoiement du puits, mouvements avoisinants	Forage de contrôle mal rebouché	Procédure de rebouchage adaptée Contrôles systématiques des forages de contrôles	Reprise du rebouchage (sur forage) Mise en place d'obturateurs en tête et en pied Recherche de vide par reconnaissance de proche en proche
	Recouvrement insuffisant SB/MC ou SO/SB	Reconnaissance fine des terrains Augmenter la hauteur de recouvrement en cas de rameaux de grande largeur ou de proximité de l'interface MC/SB	Injection à la résine

5- LES PISTES D'AMÉLIORATIONS

► LE SUIVI G3-G4: Contrôle à renforcer pour des ouvrages provisoires

Contexte particulier:

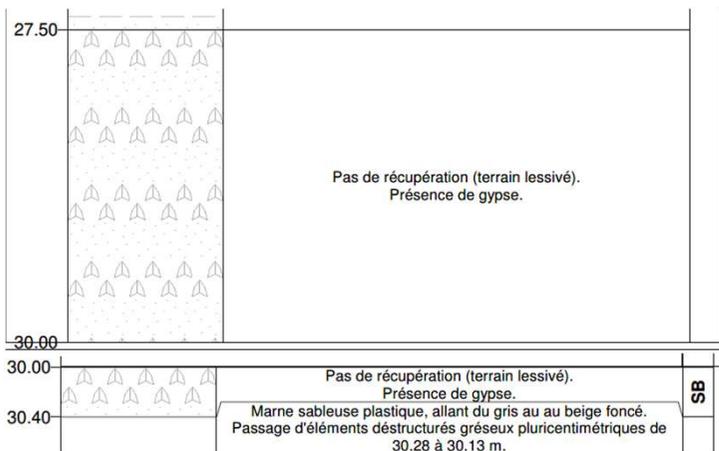
- Macro lots: multiplication des sous-traitants => homogénéisation des Procédures
- Jalons sur le calendrier d'exécution: => visa « rapide »
- Phasage: traitement avant parois moulées => injections collage
- Phasage traitement après excavation => fissuration, déformations...
- Terrains difficiles...

Piste d'amélioration:

- Renforcer la présence sur site / Points d'arrêts
- Contenu des contrôles à revoir : implantation hors ouverture, nature
- Définition des règles de réception (Interprétation des débits théoriques)

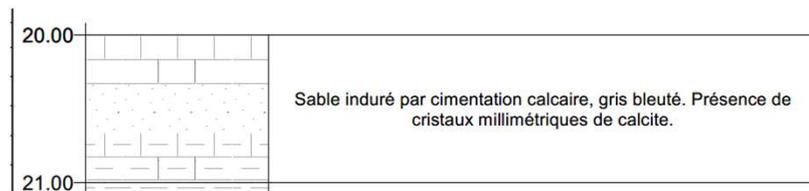
5- LES PISTES D'AMELIORATION

LES TRAITEMENTS DE TERRAIN SUR LA LIGNE 16 (jet grouting)



Cas 1: Sondage G3 au niveau d'un rameau présentant une venue d'eau au contact SB/MC
En production recouvrement JG/ IRS : 0.5m

→ 1 SC / rameau: suffisant? Description + fine?
→ description contradictoire par le MOE?



Réf. Echantillon : de 20.00 à 21.00 m
H+ 0.00 à 0.15 m : Sable induré par cimentation calcaire, gris bleuté. Présence de cristaux millimétriques de calcite.
H+ 0.15 à 0.90 m : Alternance de passées centimétriques de sable argileux et d'argile plastique à ferme gris bleuté.



Cas 2: Sondage G3 au niveau d'un rameau présentant une venue d'eau sous une couche de « sable induré » (?) de 1m (?)
L'échantillon intact => 15cm
À l'ouverture: la couche de sable induré => plus épaisse

5- LES PISTES D'AMÉLIORATIONS

➤ la norme NF EN ISO 22475-1 prélèvements de sols et des nappes - oct 2021

§5.8 remblayage et remise en état du site (comblement des forages)

Les trous de forage doivent généralement être remplis de matériaux dont la perméabilité est inférieure ou égale à celle du terrain environnant afin, par exemple, d'éviter la contamination et la mise en communication des formations aquifères. Si un coulis est utilisé, il convient qu'il soit mis en place au moyen d'un tube plongeur descendant jusqu'au fond du trou de forage. Le tube plongeur doit être remonté lentement au fur et à mesure de la mise en place du coulis. En cas d'influence sur des projets futurs, des exigences techniques spéciales relatives au remblayage doivent être spécifiées à l'avance, par exemple pour des projets de tunnels. Les techniques empêchant l'apparition de vide doivent être utilisées pour la mise en place du matériau de remblayage dans le trou de forage.

5- LES PISTES D'AMÉLIORATIONS

➡ LES ATELIERS INTER – MOE DE PARTAGE D'EXPERIENCE

Thèmes abordés:

- Puits d'essais,
- Campagne G3,
- Traitements de terrain:
 - sujet principalement partagés soulèvements et résurgence lors du jet grouting
 - Prochain atelier sur les venues d'eau ?
 - bibliographie trop discrète...

6- CONCLUSION

- Réduction de la perméabilité des sols à 5×10^{-6} (à 5×10^{-7} m/s) par JG et IRS (bouchon, rameau) pour les formations CSO- SB - MC et CG Altéré
- Travaux provisoires mais avec un risque délai et coût très important
- Plots d'essai recommandé (injection) ou systématique (jet grouting, injection d'imprégnation)
- Nécessité de deux phases de contrôle :
 - 1) A la réception des travaux de traitements
 - 2) Puis après excavation par forages horizontaux depuis le fond de fouille,

Forages de contrôle des travaux: bonne ou mauvaise solution?

Renforcer les reconnaissances géotechniques en phase G3 sur les rameaux?

Description contradictoire MOE–entreprise des sondages carottés G3 au droit des rameaux?