



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Traitement et amélioration des sols

Traitement de terrain: de la conception à l'exécution

JST DU 05/04/2023



setec
terrasol

spie batignolles

/fondations

Martin Cahn (Terrasol) & Nicolas Romanowski (SPIE)

Journée parrainée par KELLER:



Conception des traitement de terrain...

1) Identifier et définir les besoins de traitement

➤ Traitements de terrain permettent de répondre à une pluralité de besoins

A) Consolidation

- Comblir les vides et zones décomprimées
- Améliorer la résistance
- Diminuer la déformabilité

B) Etanchement

- Diminuer les débits d'exhaure
- Réduire les infiltrations

C) Compensation

- Compenser les tassements en cours de travaux
- Compenser les mises en pentes à posteriori

D) Régénération et collage

- Pérenniser une structure
- Améliorer le contact terrain/structure

→ Les techniques de traitement des sols sont très différentes de celles de traitement des roches fracturées

Conception des traitement de terrain...

2) Déterminer les objectifs des traitement

➤ Traitements de terrain permettent de répondre à une pluralité de besoins

A) Consolidation

- Réduire les tassements
- Améliorer la sécurité vis-à-vis des mécanismes de ruptures géotechniques
- Traiter le risque de liquéfaction
 - Diminution de l'indice des vides
 - Augmentation des modules
 - Augmentation des paramètres de résistance

B) Etanchement

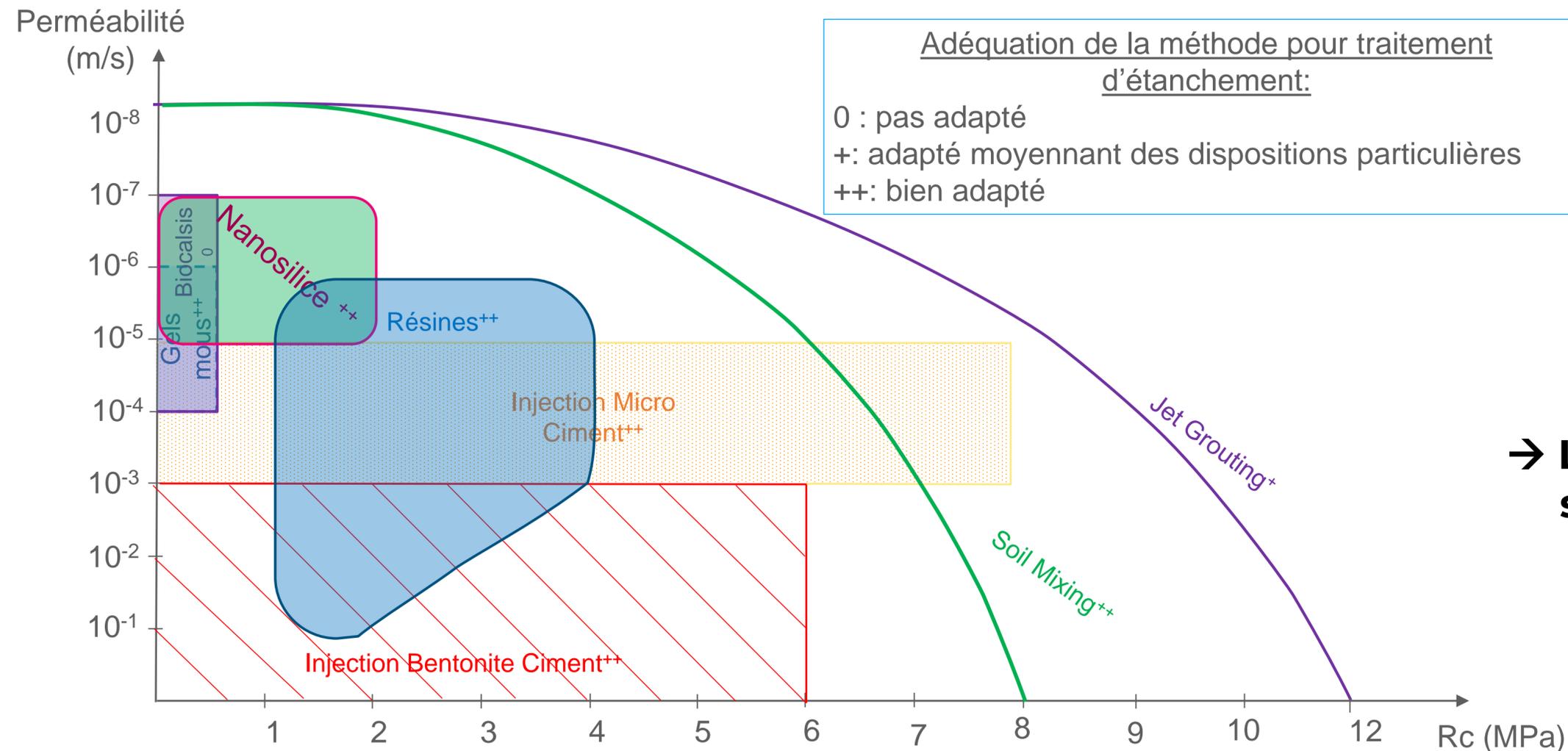
- Diminuer l'impact sur l'environnement et respecter les limites normatives (DLE)
- Permettre l'adéquation des dispositifs de mise hors d'eau / débits d'exhaures
- Permettre l'exploitation de l'ouvrage
 - Diminution de l'indice des vides
 - Diminution de la perméabilité

- Définition de critères de conception clairs et prédéfinis est impératif pour ajuster l'objectif du traitement
- Durée de performance attendue pour le traitement est à considérer

→ Ces critères orientent le choix de la technique et le besoin de reconnaissance

Conception des traitement de terrain...

3) Choix des techniques



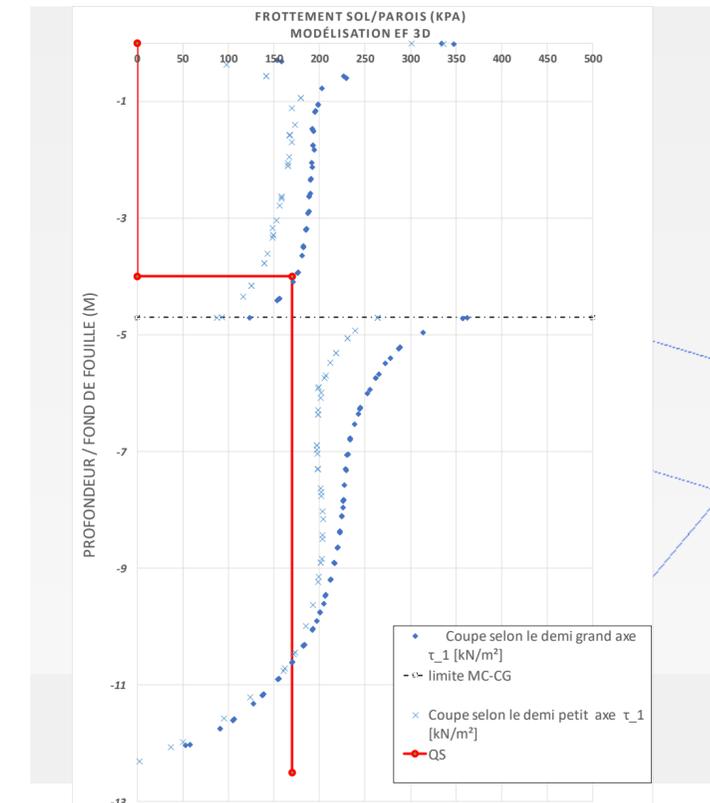
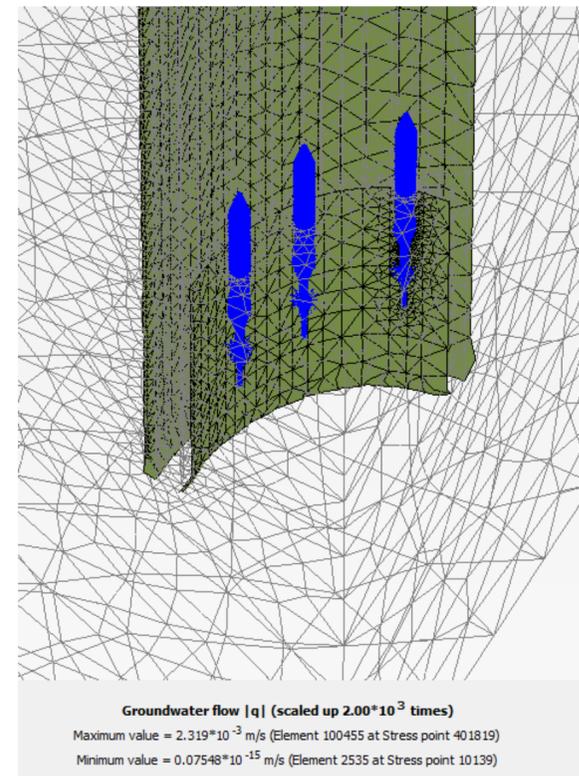
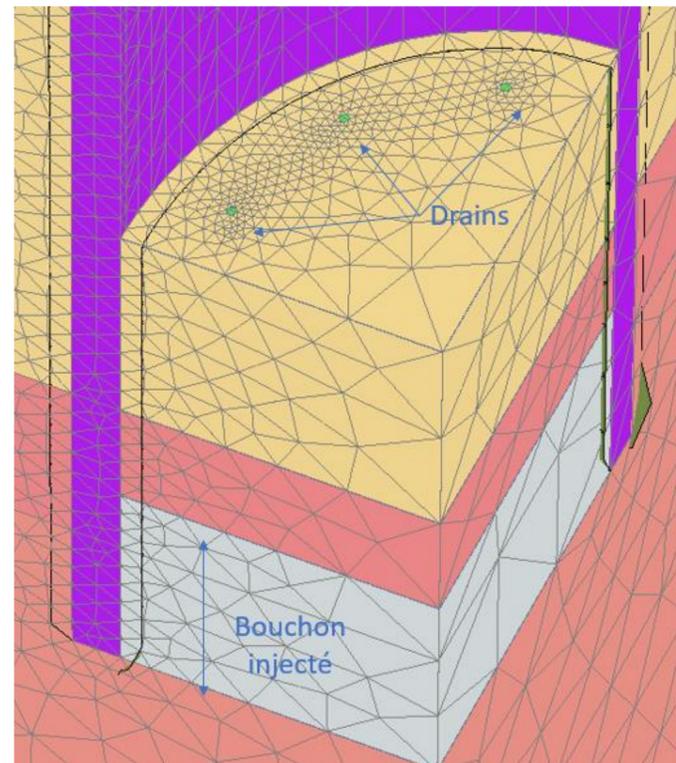
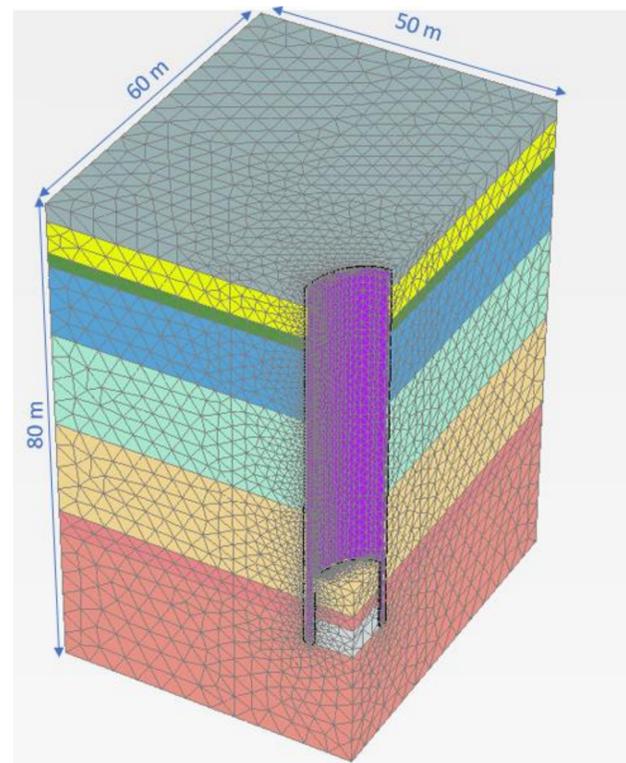
→ **Le choix de la méthode est souvent un compromis !**

- **Le choix du procédé constructif est également dicté par l'environnement au sens large**
- Profondeur de traitement et contraintes géostatiques
 - Conditions d'accès
 - Effet du traitement sur l'environnement: soulèvement/résurgences/pollution de la nappe

Conception des traitement de terrain...

4) Définition des critères de traitement

- Géométrie de traitement et quantification de la diminution de perméabilité/ amélioration des caractéristiques mécaniques : fruit d'un démarche calculatoire
- Exemple du puits d'entrée en terre d'un tunnelier elliptique:

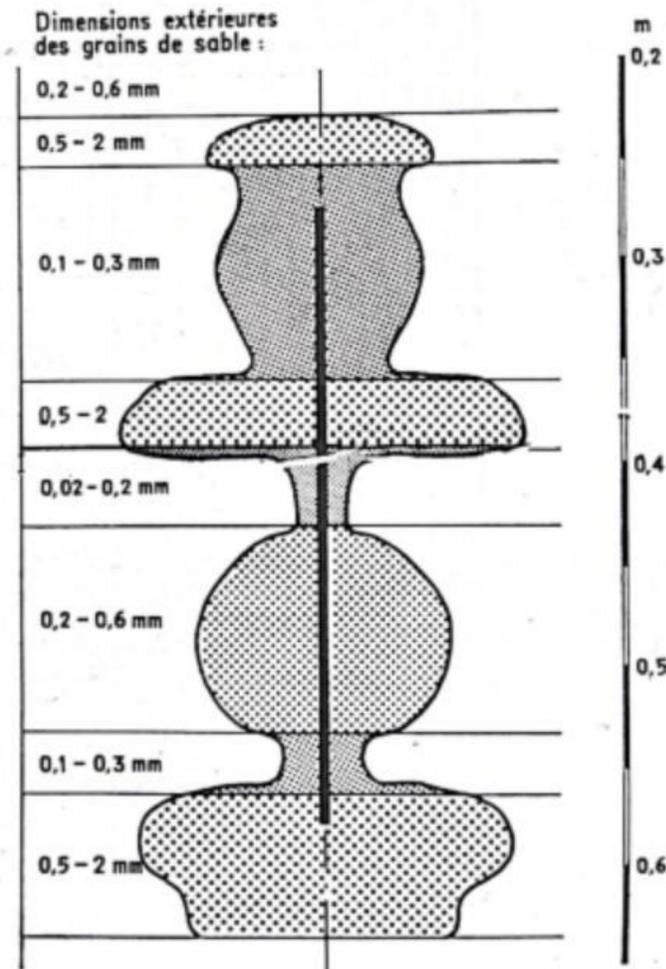


- ➔ Perméabilité du bouchon injecté de 5 m d'épaisseur: 10^{-6} m/s permettant une réduction des débits d'exhaure adéquate
- ➔ Pas de prise en compte d'amélioration des caractéristiques mécaniques et stabilité assurée par effet voûte

Conception des traitement de terrain...

4) Définition des critères de traitement

➤ Géométrie de traitement par **injection** fonction:

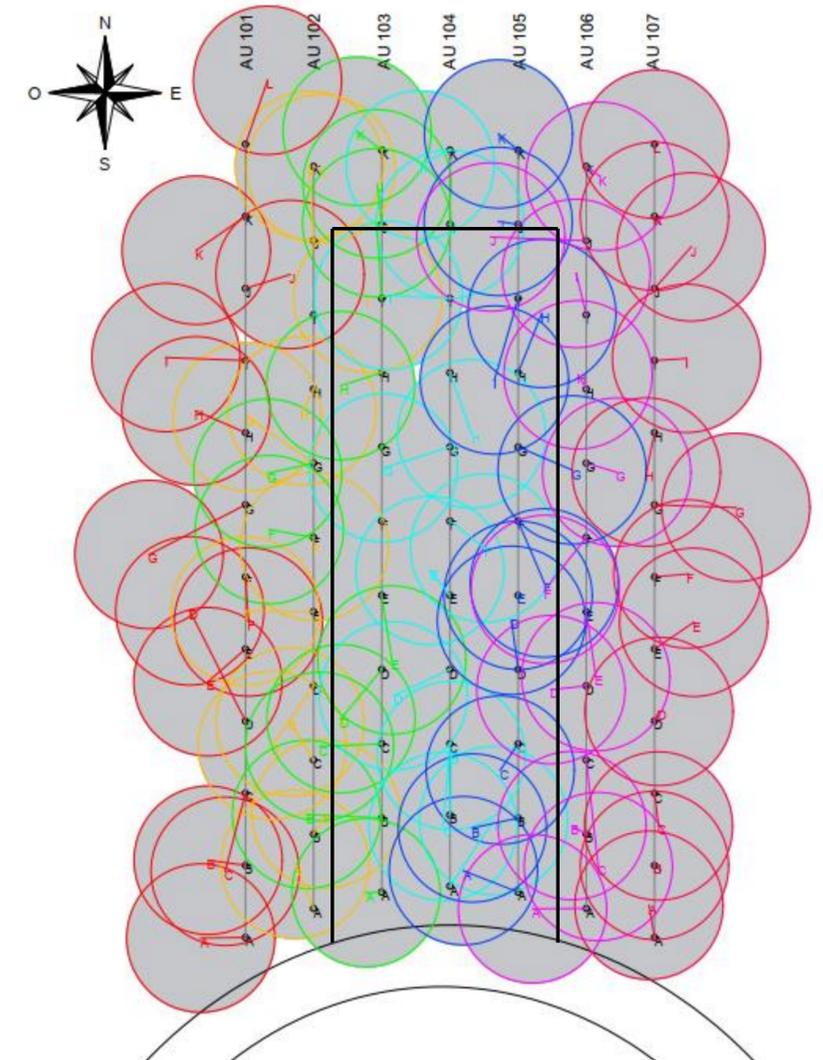


Cambefort 1967

- ✓ De la nature des terrains
- ✓ De l'objectif
- ✓ Des paramètres d'injections retenus (débits, pression, volume)
- ✓ Des déviations
- ✓ Des gradients critiques admissibles

Nature du Sol	Perméabilité (m/s)	Espacement de la maille (m)
- Galets	10^{-2}	2,5 à 3,5
- Sable et graviers	10^{-2} à 10^{-3}	1,5 à 1,7
- Sable moyen	10^{-3} à 10^{-4}	1,2 à 1,5
- Sable fin	10^{-4} à 10^{-5}	1 à 1,2
- Sable silteux	10^{-5}	0,8 à 1

AFTES GT08 2006



Mesure de déviation SPIE

Conception des traitement de terrain...

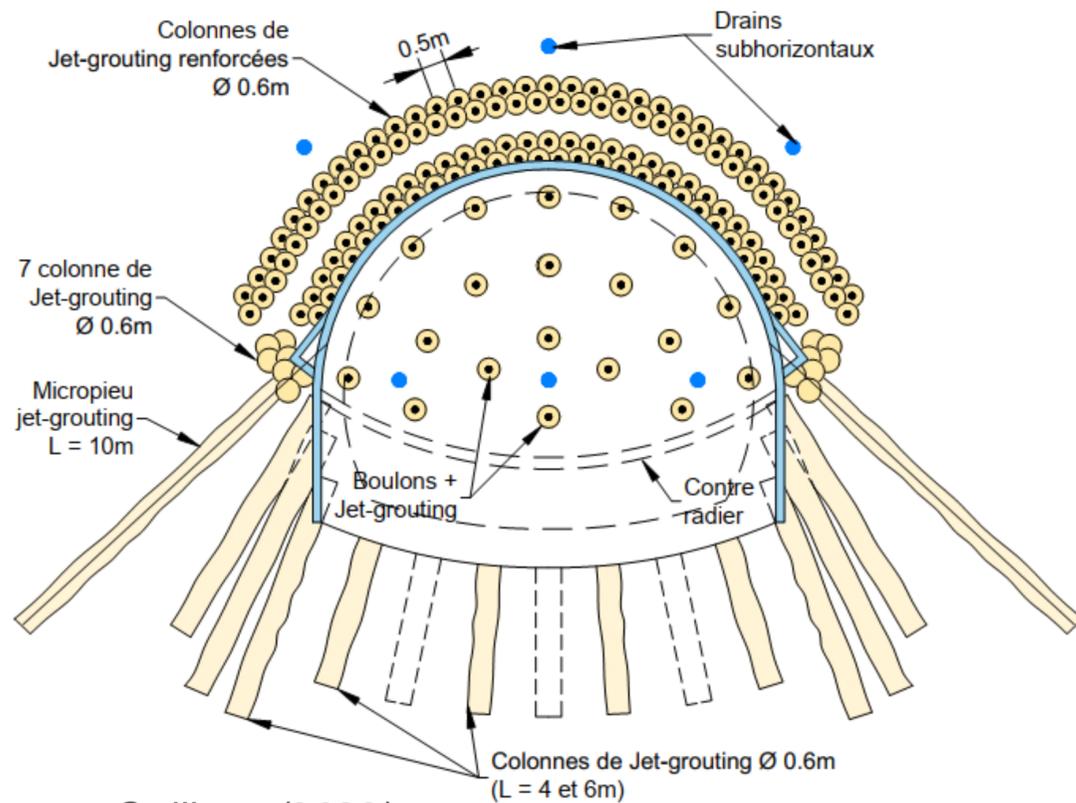
4) Définition des critères de traitement

➤ Géométrie de traitement par **Jet Grouting** fonction :

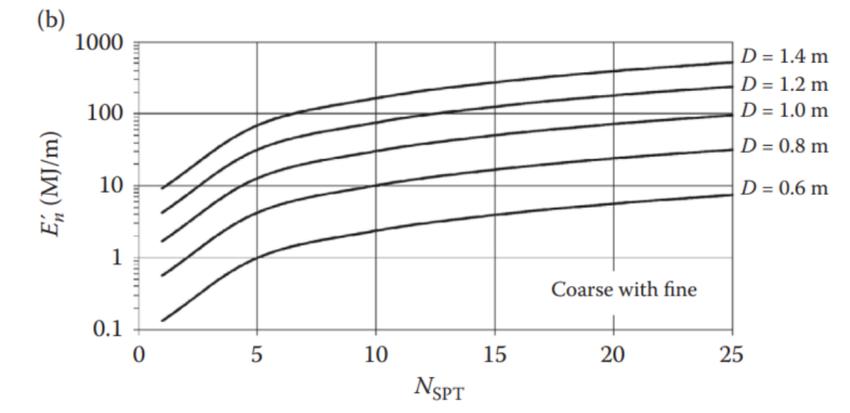
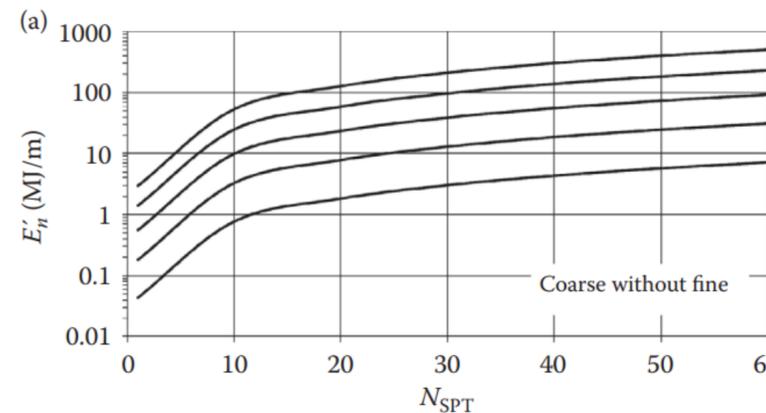
- De la nature des terrains
- De l'objectif
- Des paramètres d'injections retenus : énergie
- Des déviations
- Des gradients critiques admissibles

→ Le diamètre de la colonne est proportionnel à l'énergie développée et inversement proportionnel à la résistance du terrain:

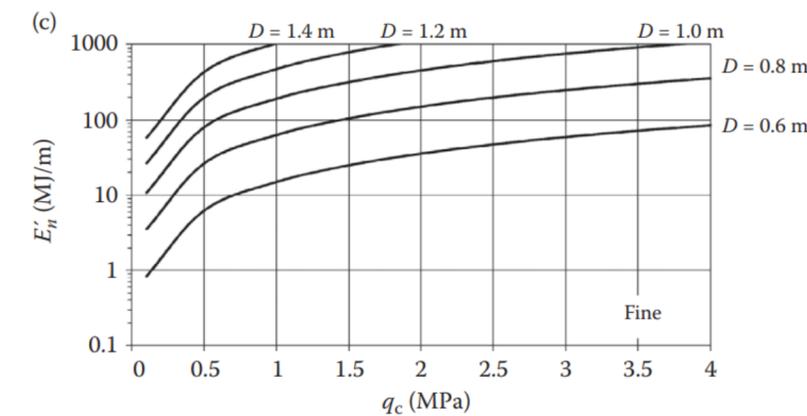
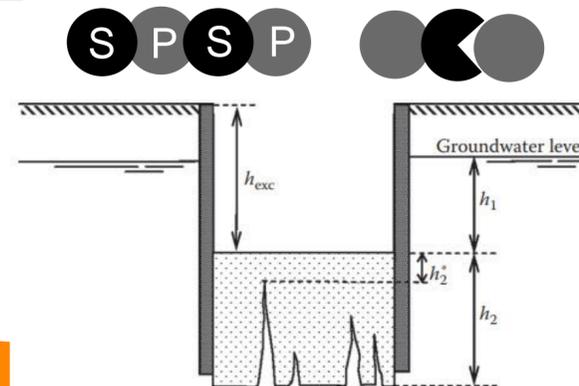
$$E \left[\frac{MJ}{m} \right] = \frac{Q \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot P [MPa]}{v \left[\frac{m}{s} \right]} \quad \frac{D_{moyen}}{D_{réf}} = \left(\frac{E}{E_{réf}} \right)^\beta \left(\frac{S}{S_{réf}} \right)^\alpha$$



Guilloux (2022)



Attention aux « effets masque »



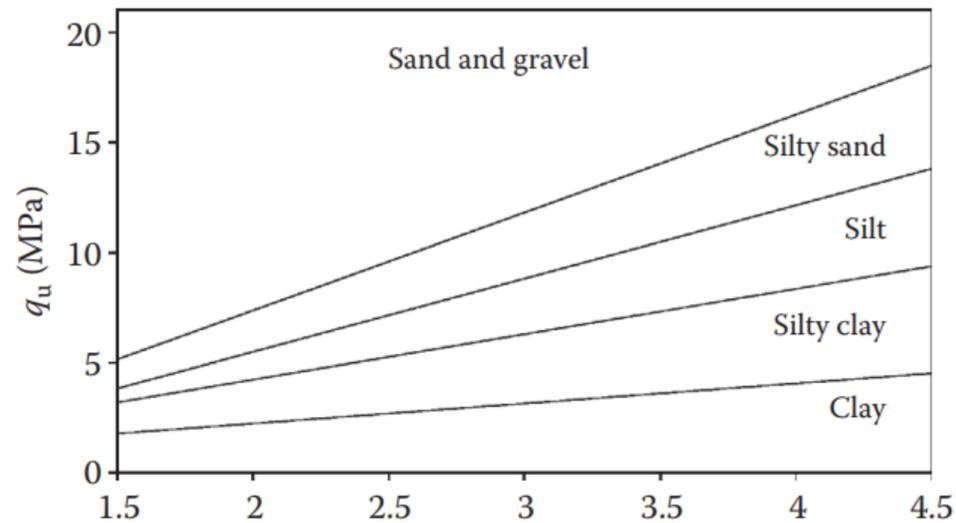
Croce et al (2014)

Conception des traitement de terrain...

4) Définition des critères de traitement

➤ Paramètres mécaniques des terrains traités

Jet



Weight of cement per unit volume of column (kN/m³)

$$E_{50} = \beta_E \cdot q_u$$

Table 4.12 Relationship between young moduli and uniaxial compressive strength of jet-grouted material from the literature

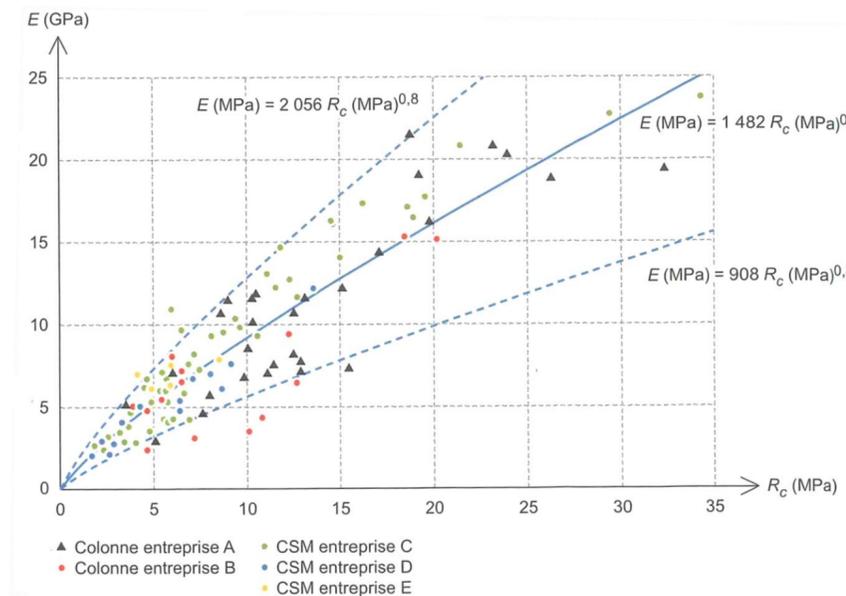
Reference	Definition of E	Soil type	β_E
Mongioli et al. (1991)	Tangent unspecified	Gravel	280–1000
Lunardi (1992)	Secant at 40% q_u	Gravel and sand	500–1200
Nanni et al. (2004)	Tangent unspecified	Gravel and sand	440–1000
Croce et al. (1994)	Tangent unspecified	Sandy gravel	210–670
Croce and Flora (1998)	Secant at $\epsilon_a = 0.01\%$	Silty sand	220–700
Nanni et al. (2004)	Tangent unspecified	Silty sand	330–830
Fang et al. (2004)	Tangent at 50% of the failure stress	Silty sand	300–750
Fang et al. (2004)	Tangent at 50% of the failure stress	Silty sand, silty clay	100–300
Lunardi (1992)	Secant at 40% q_u	Silt and clay	200–500

Croce et al (2014)

Soil Mixing

Type de sol	Quantité de ciment (kg/m ³ de sol)	Rc à 28 jours (MPa)
Sables grossier et graviers	200 - 300	3,5 à 8
Sable moyen à fin	200 - 300	3 à 4
Limon à sable limoneux	200 - 300	2 à 4
Argile moyennement à très raide	200 - 300	1 à 2
Argile molle	200 - 300	1 à 2
Argile organique	200 - 300	<1
Tourbe	250 - 450	<0,5

Amélioration et renforcement des sols (2018)



Denies et al (2012)

Injections

« Si le terrain était homogène on pourrait calculer facilement les volumes à injecter en se basant sur le pourcentage de volume de vides du sol. Mais en fait il n'est jamais ainsi » Cambefort

- Injection sans déplacement de sol → imprégnation dans les sols granulaires :

$$R_{C_{Terrain\ injecté}} = R_{C_{coulis}} \times \rho \text{ avec } \rho \text{ \% d'incorporation}$$

- Injection avec déplacement → claquage dans les sols fins:

Resserrement du terrain : diminution de l'indice des vides:

- ✓ Augmentation du frottement interne;
- ✓ Augmentation de la compacité;

Effet de ce resserrement est difficilement quantifiable à priori.

Conception des traitement de terrain...

4) Définition des critères de traitement

➤ Essais labo et planche d'essai:

- Confirmer l'injectabilité des terrains
- Adapter les formulation de coulis
- Ajuster les paramètres de traitement : Maillage - Débit, pression, volume – Energie, dosage en ciment – Indice de malaxage, dosage en ciment
- Adapter les paramètres de réception : Corrélation entre comportement du massif/ essais de laboratoire / essais in situ

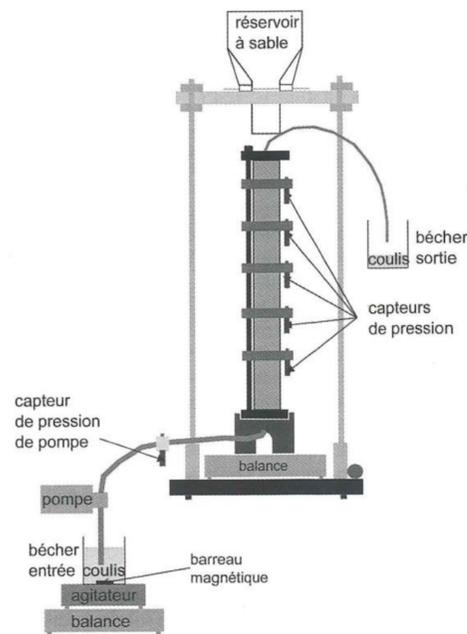
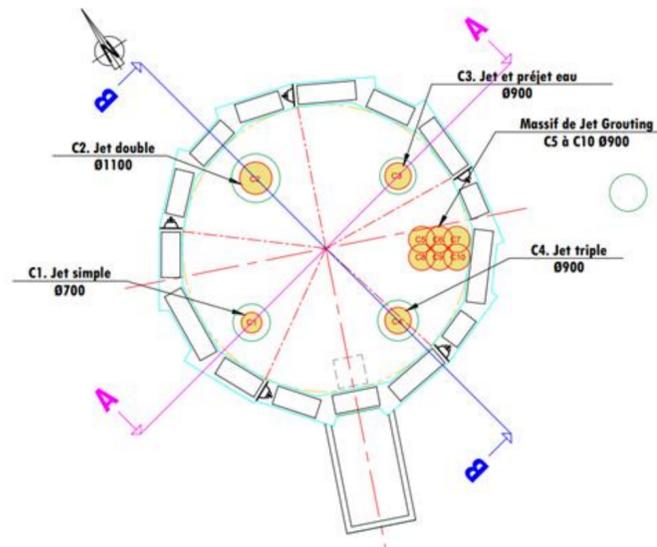
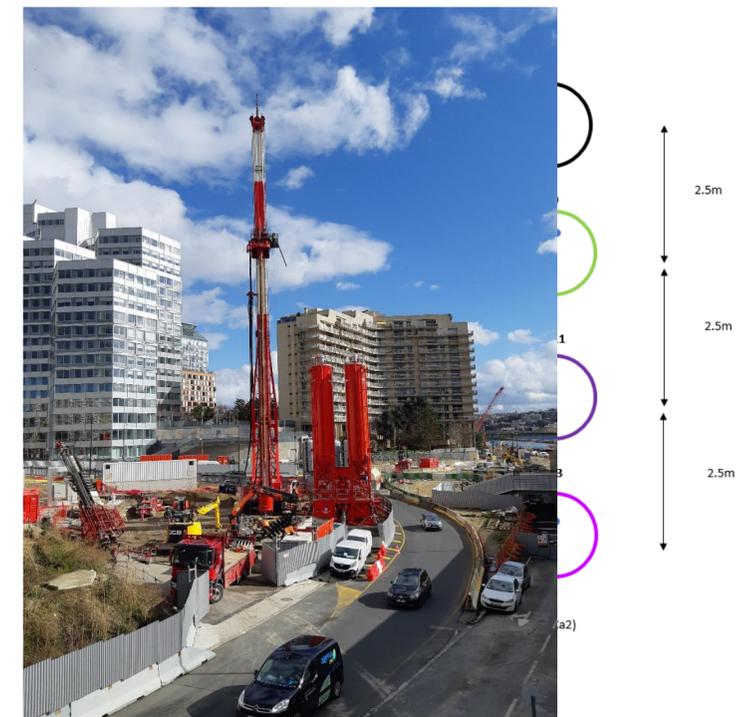


Schéma de principe de l'essai d'injection sur colonne.

Dupla et al (2004)



Puits d'essai de Boulogne (Poret et al 2016)

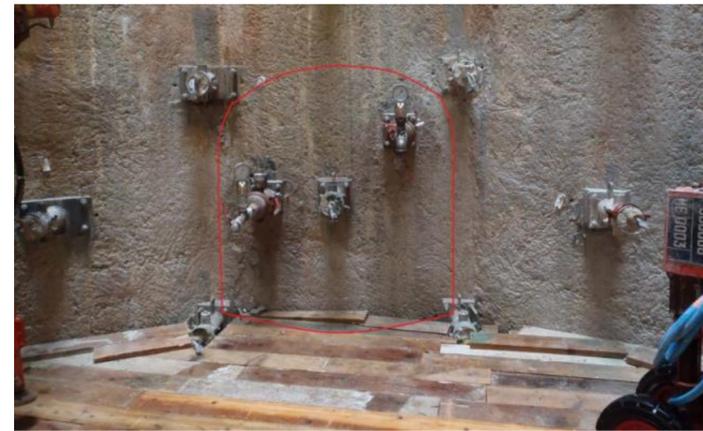
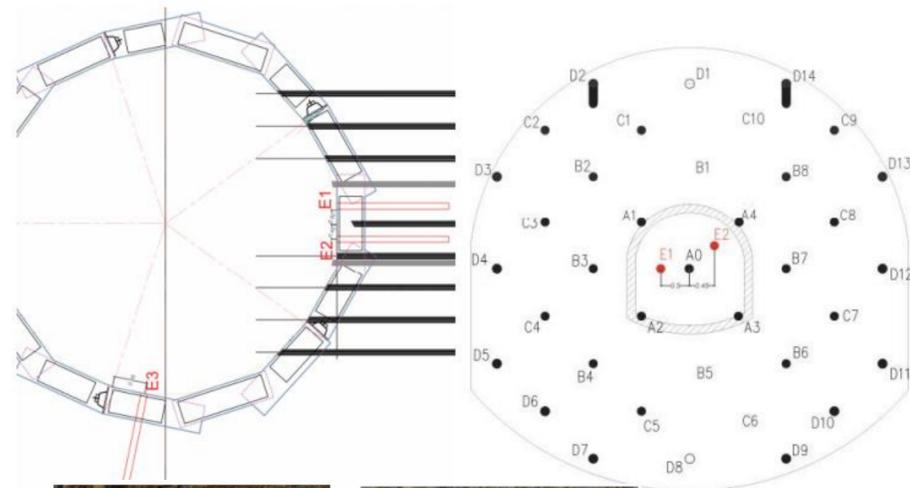


Plot d'essai Soil Mixing Pont de Sèvres (Mathieu et al. 2021)

Conception des traitement de terrain...

5) Détermination des critères de réception

- Critère de réception « mesurables » et compatible avec les planning travaux
- Procédure d'essais de réception et interprétation à adapter aux massifs traités
- Durée des essais de réception à intégrer dans les plannings
- Représentativité des essais de réception à analyser à la lumière du suivi et de l'interprétation des paramètres de traitement



Puits d'essai de Boulogne:

- Contrôle des injections par deux drains sous sas et comparaison des débits avec un drain similaire située dans une zone non injectée;
- Réduction de la perméabilité par un facteur 100

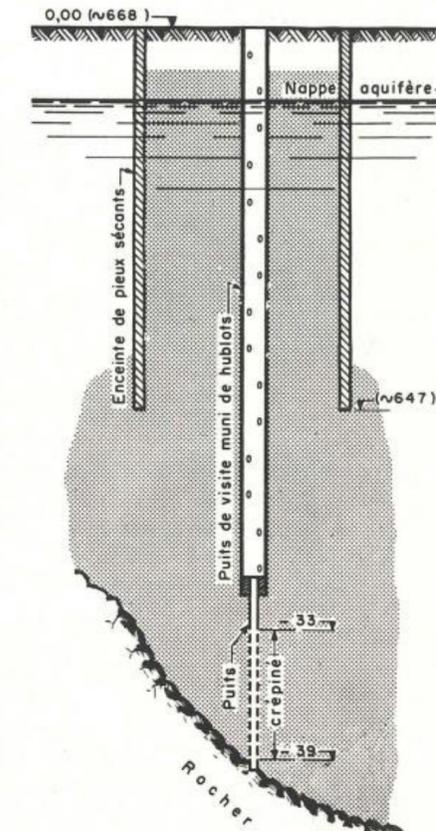


Fig. 15-5. — Barrage de Serre-Ponçon. Puits pour l'observation des alluvions injectées en profondeur. (Doc. SOLÉTANCHE).

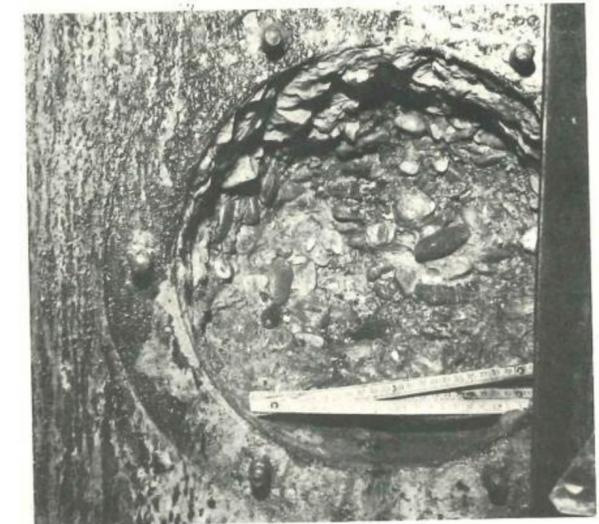


Fig. 15-6. — Alluvions injectées derrière l'un des hublots du puits de Serre-Ponçon (Photo SOLÉTANCHE).

Barrage de Serre-Ponçon

- Puits d'observation dans un pieux foré boue d'1,3 m de diamètre et 30 m de profondeur (Cambefort 1976)

... à l'exécution des traitements de terrain

6) Choix des procédures d'exécution

- Choix du maillage
 - Entraxe - Maille carré / Maille triangulaire
- Détermination des formulations de coulis en fonction des objectifs visés et des caractéristiques de terrain
 - Coulis de ciment
 - Micro-ciment ou Gel
 - Combinaison des coulis
- Estimation du taux de traitement
- Choix de la technique de forage la plus adaptée :
 - Outils de forages
 - Fluides de forages (eau, boues, ...)
 - Rotation, rotopercussion, tête vibrante, ...
- Paramètres de traitement
 - Pression/volume/débit
 - Energie de jet



→ La réflexion sur la nécessité ou non d'utiliser un système de tubage influence le choix de la technique de forage

L'ensemble de ces paramètres sont basés sur des essais de sol « ponctuels », sur des recommandations (Guide AFTES) et sur des REX

→ Il est donc important de valider ces choix par un plot d'essai

... à l'exécution des traitements de terrain

7) Adaptation des procédures d'exécution

- Le choix de la technique peut-être également dicté par des contraintes extérieures (travail fonds de puits) ou par des contraintes hydro-géologiques (présence de nappe)



→ Injection sous un ouvrage sous la nappe

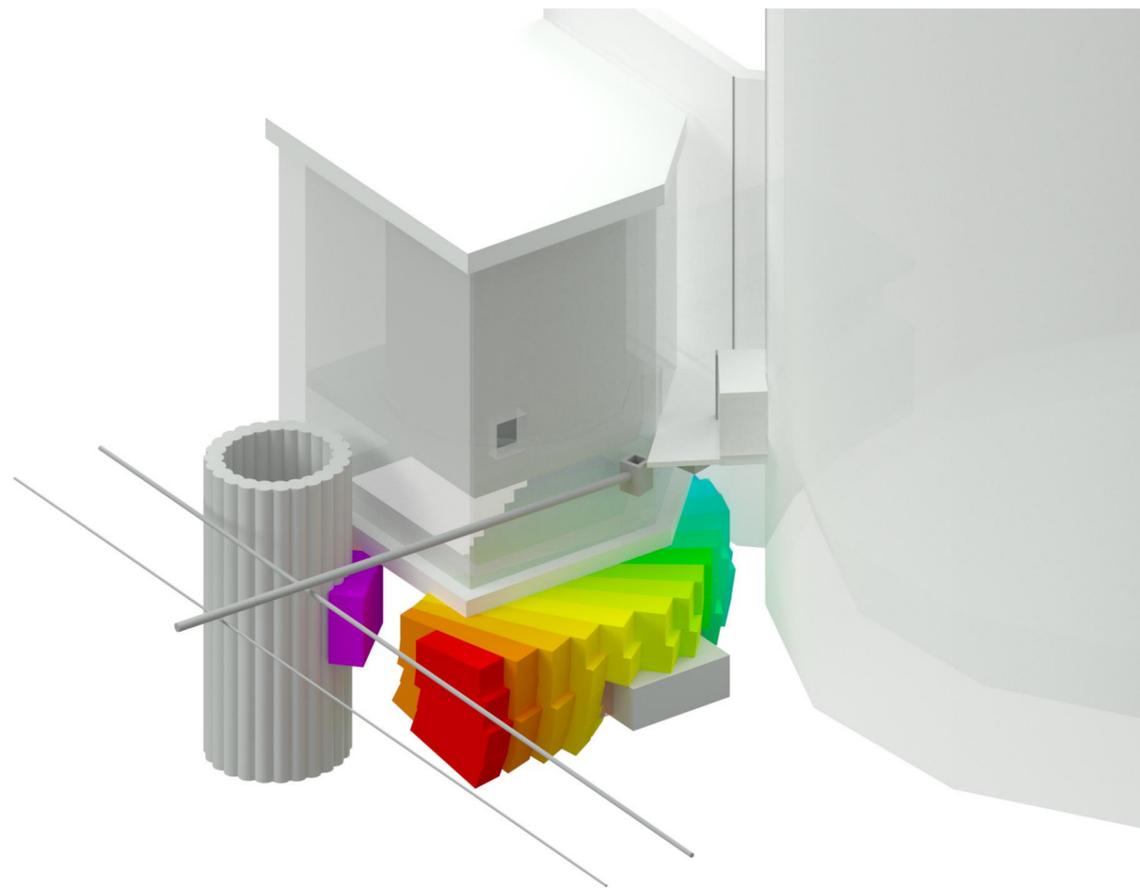


→ Injection entre des conduites BONNA

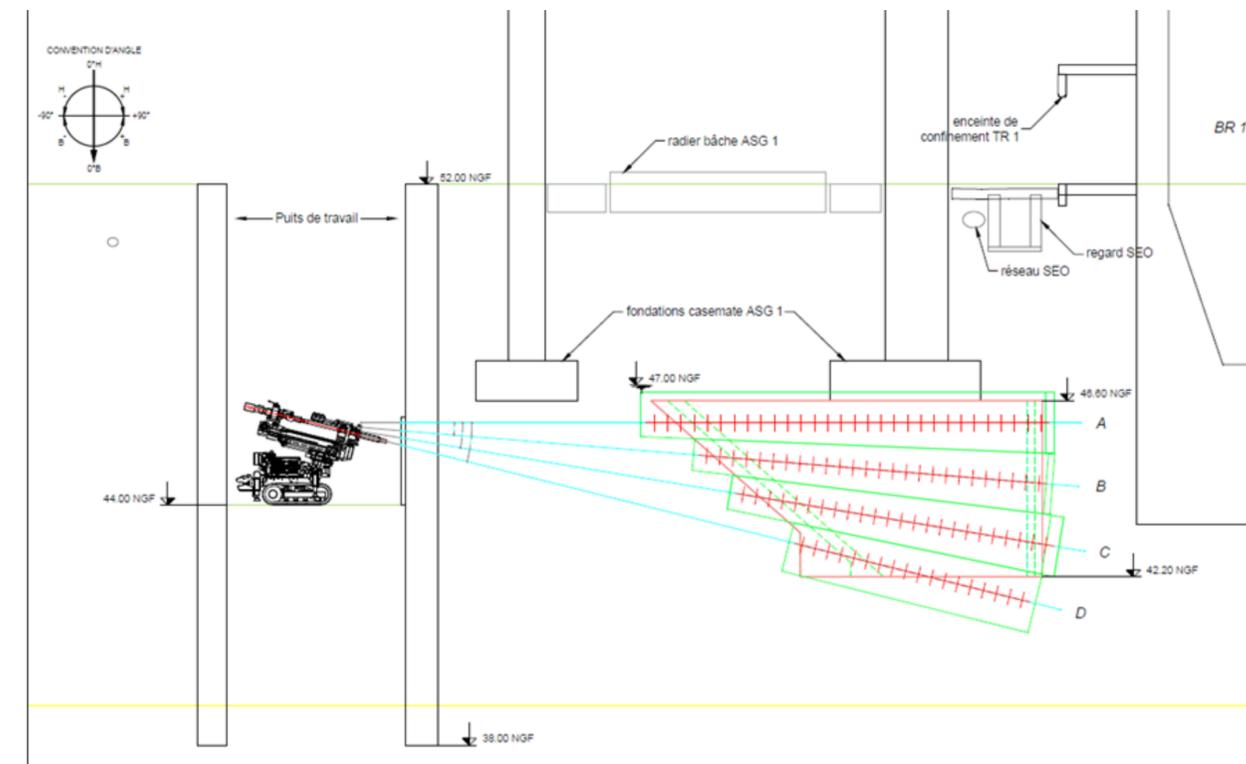
... à l'exécution des traitements de terrain

7) Adaptation des procédures d'exécution

- Les injections de traitement fin nécessitent des moyens informatiques adaptés lors des phases études



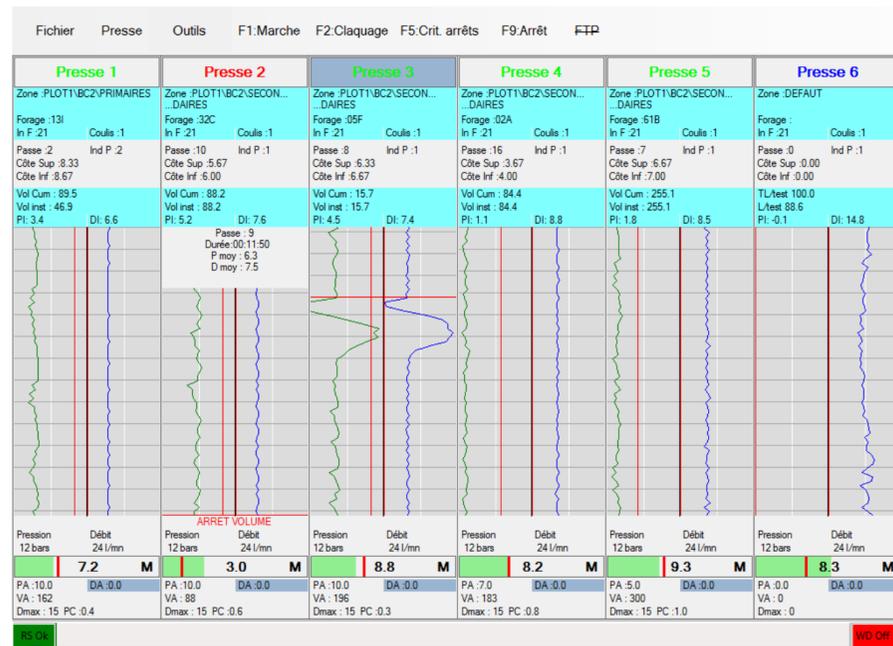
→ Logiciel de modélisation 3D permettant de gérer les contraintes extérieures (réseaux, infrastructures, ...) et d'adapter les forages en conséquences afin de traiter la zone



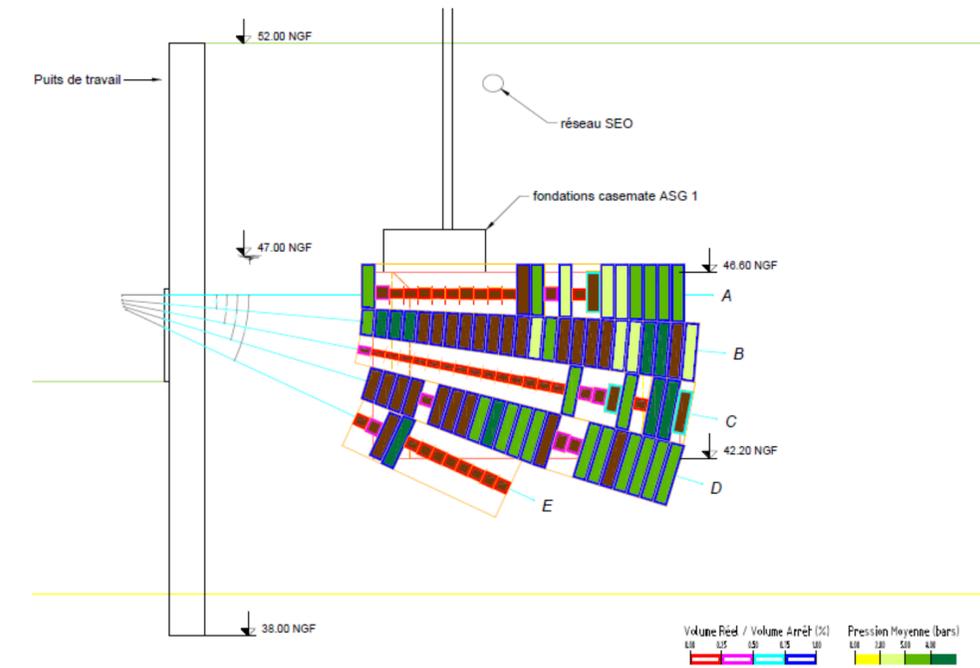
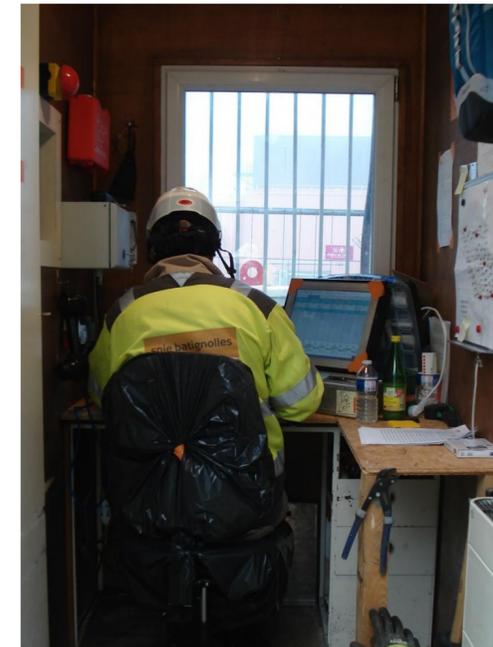
... à l'exécution des traitements de terrain

8) Pilotage des injections en cours d'exécution

- Les injections d'imprégnation nécessitent des moyens informatiques adaptés en phase exécution
 - Pilotage des injections à partir des données issues de la conception 3D
 - Régulation des presses d'injection en volume, débit et pression en fonction des consignes prédéterminées
 - Acquisition en continue des données



Logiciel de pilotage des injections



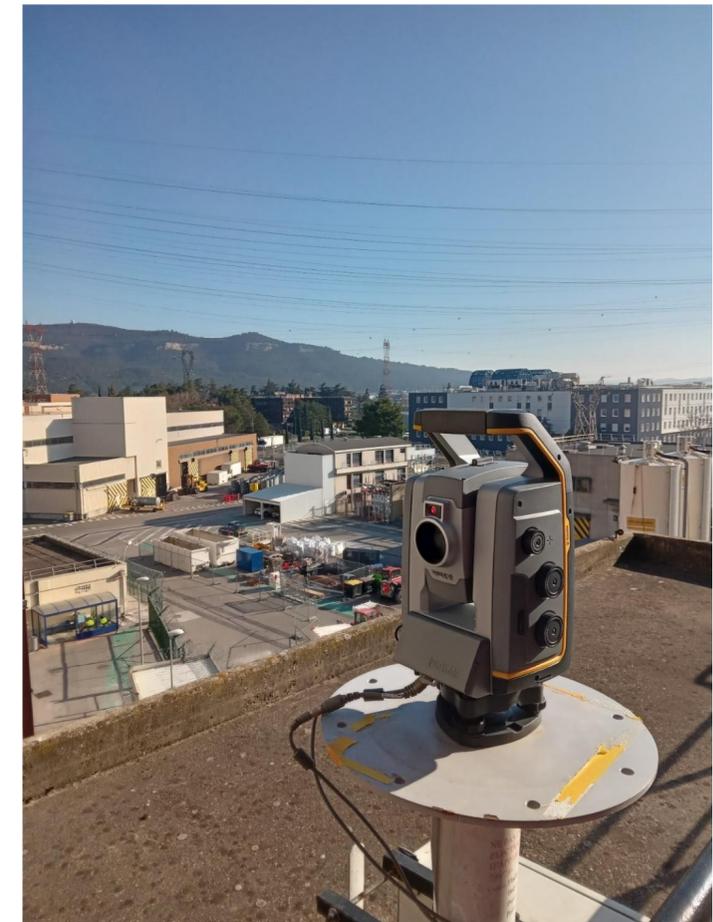
➔ Malgré l'évolution des outils informatiques, le savoir-faire humain reste prépondérant

... à l'exécution des traitements de terrain

9) Adaptation en cours d'exécution

- La modification des critères d'injections notamment de la pression d'arrêt (débit ?) est possible en cours de chantier
- Il est nécessaire d'analyser les réponses du terrain aux injections :
 - Phénomène de claquage de terrain
 - Dispersion du coulis
- Le suivi des mouvements des avoisinants est également un moyen de pilotage des injections

→ La réalisation d'un plot d'essai ne permet pas toujours de s'affranchir d'adaptation de méthodologie de traitement ou de modification des critères d'injection



Conclusions

Une bonne conception d'un traitement de terrain nécessite :

- L'identification claire des objectifs du traitement
- Des reconnaissances de sols adaptées aux méthodes envisagées
- La définition de critères de traitement compatibles avec les capacités de la technique retenue
- La prise en compte des effets du traitement sur l'environnement lors du choix de la technique
- La réalisation, aussi tôt que possible, de planches d'essais
- La définition de critères de réception mesurables, sécurisés et intégrés dans les plannings travaux

Une bonne exécution d'un traitement de terrain nécessite :

- Un choix de procédures d'exécution compatible avec les objectifs recherchés
- Un suivi et une interprétation des paramètres de traitement permettant de garantir l'homogénéité du traitement de terrain et la représentativité des essais de réception



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Merci de votre attention

Merci à Philippe Mercier, Basile
Leconte, Maxime Fonty et Michel
Chopin

TRAITEMENTS ET AMÉLIORATION DES SOLS



spie batignolles

/ fondations