

# LES RECOMMANDATIONS DE L'AFTES

WEBINAIRE  
22-23 septembre 2020

Conception et Réalisation  
de  
travaux d'injection de sols et roches





## **Conception et Réalisation des travaux d'injection de sols et roches**

L'AFTES, publiait en juillet/août 1975 (Revue TOS GT8) la première recommandation concernant les travaux d'injection.

Le GT8 propose en 2020, une mise à jour de la recommandation 2006, (Revue TOS n°194-195), qui porte sur le développement technologique (REX - Evolutions matérielles, matériaux) et l'intégration des risques techniques dans la contractualisation et la rémunération des travaux.

## 1 - Dispositions générales

### Travaux géotechniques Spéciaux – Injection EN 12715

#### CML3 Cairo Phase 3-1





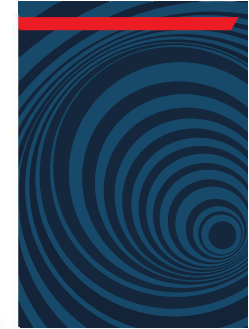
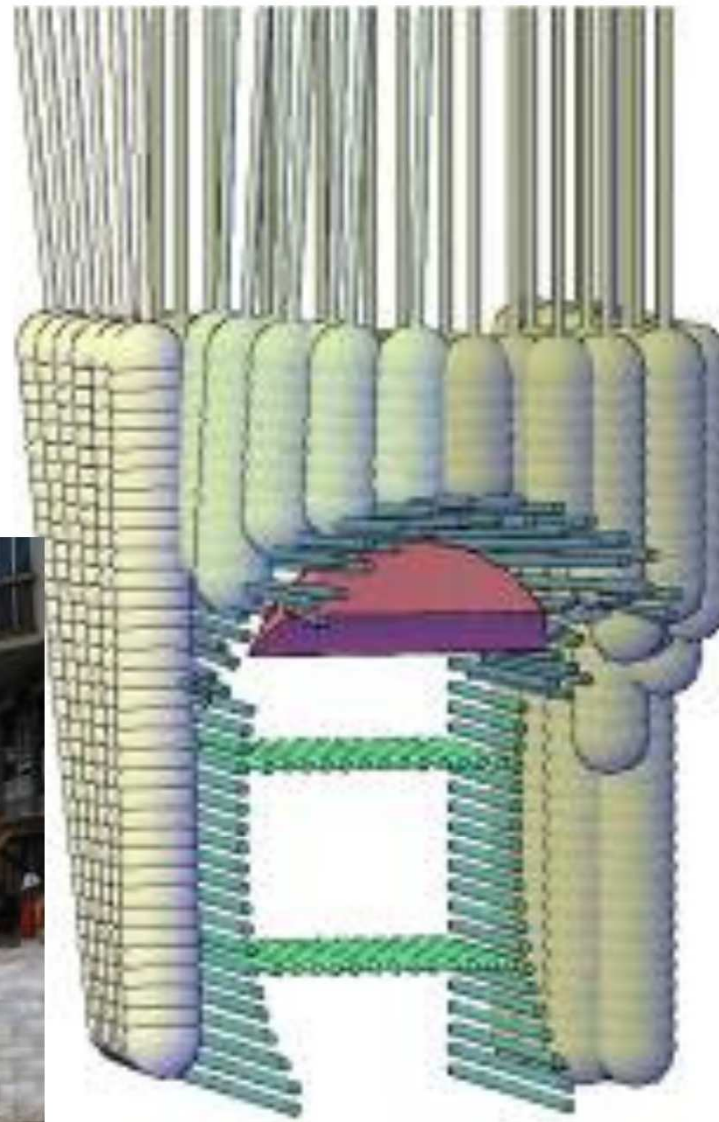
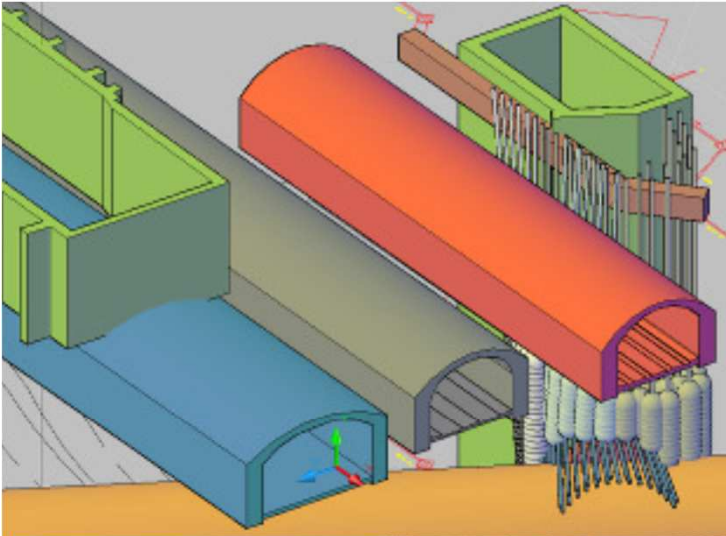
## 1.1. Intégration à l'ouvrage.

L'injection est un procédé d'amélioration des sols, qui fait partie des travaux géotechniques spéciaux, dont les modalités d'exécution figurent à la norme CEN 12715.

Technologie basée sur l'imprégnation de la porosité intergranulaire des sols ou les discontinuités des formations rocheuses, à l'aide de suspensions ou solutions auto-durcissables, qui modifient les caractéristiques hydrauliques ou mécaniques

Réduction de la perméabilité – Augmentation de la cohésion et du module de déformabilité.

Cette amélioration des terrains de fondations, contribue à la faisabilité de l'ouvrage et devient ainsi une disposition constructive intégrée à l'ouvrage.



Metro Barcelone Linéa 9 Doc EQIOM



## 1.2. Fonctionnalités et Pathologies

Les pathologies des ouvrages géotechniques (EN 12715) sont le plus souvent liées à un déficit d'investigation et de connaissance du contexte géologique et environnemental de l'ouvrage, avec pour conséquence:

Absence d'identification ou de prise en compte des risques techniques du projet au stade EP (MO-AMO).

Choix de techniques d'injection sans validation de faisabilité par exemple:

Granulométrie Sol / matériaux d'injection (D15/d85) incompatible.  
Contraintes géostatiques ( $\sigma_v/h$ ) insuffisantes.

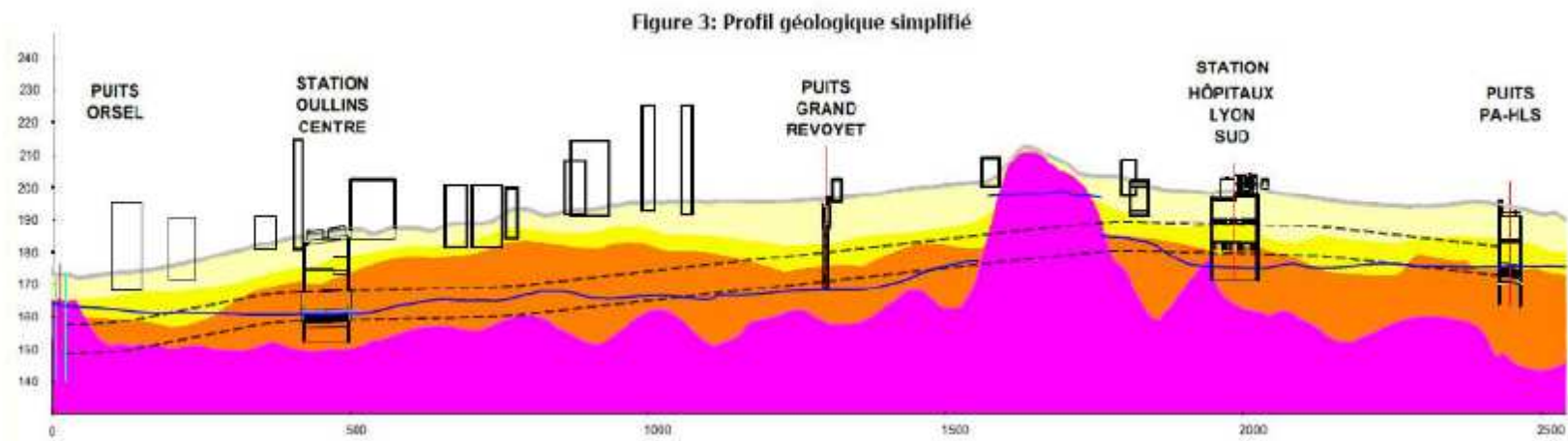
Difficulté de gestion des études au stade AVP.

Transformation des méthodes et mises en adéquation des dispositions constructives

Validation adaptations (MO) Impact budgétaires.



## 2 - Projet – Programme (MO)



## 2.1. Conception & Intégration environnementale (MO-AMO)

L'étude préalable des conditions de réalisation d'un projet et des travaux subséquents, requis par le contexte environnemental de l'ouvrage, relève des prérogatives du MO et/ou AMO (selon compétences).

Des investigations géotechniques et hydrogéologiques sont indispensables à ce stade pour identifier la pathologie du site et les conditions de faisabilité doivent être approchées en amont des études AVP PRO (MOE).

La faisabilité de l'injection et donc du projet, selon les dispositions constructives envisagées est directement dépendante de la localisation des formations et de la connaissance des faciès, des formations, qui conditionnent la faisabilité du traitement,





## 2.2. Etudes MO AMO Préliminaires (EP) Investigations (G1)

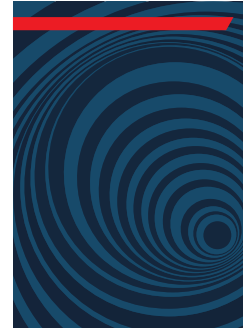
La plupart des ouvrages souterrains tunnels ou réseaux comportent des accès et services (Stations, puits ou autres types d'ouvrages) situés en profondeur et généralement sous nappe.

**Concept** : le traitement de terrain par Injection des terrains de fondations est une solution usuelle (phase provisoire ou définitive).

**Action requise** : vérification faisabilité et validation :

Identification du contexte géologiques et hydrogéologiques du site.(G1) :  
Essais in situ . Sondages, prélèvements et caractérisation labo.  
Essais d'eau ponctuels et/ou essais de pompages.

**Si invalidation : sélection de solutions alternatives**



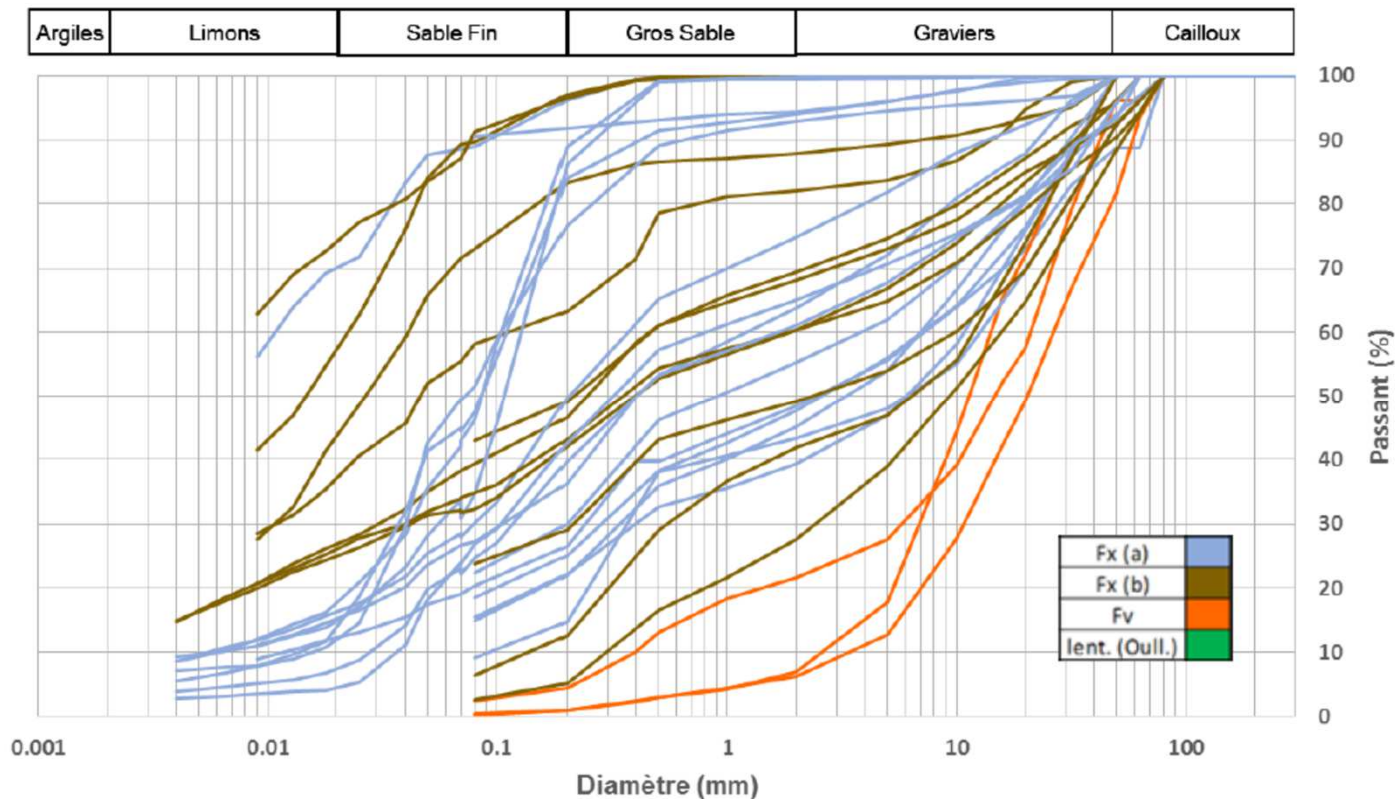
## 2.3. Connaissance de de l'environnement de l'ouvrage

Le fuseau granulométrique attaché illustre l'importance de la connaissance du contexte géologique et hydrogéologiques Il s'agit d'une formation alluviale fortement hétérogène qui requière une connaissance approfondie de la position et de l'extension des formations en présence :

Orange: Galets, graviers, sables grossiers

Bleu : Sables et graviers (standard)

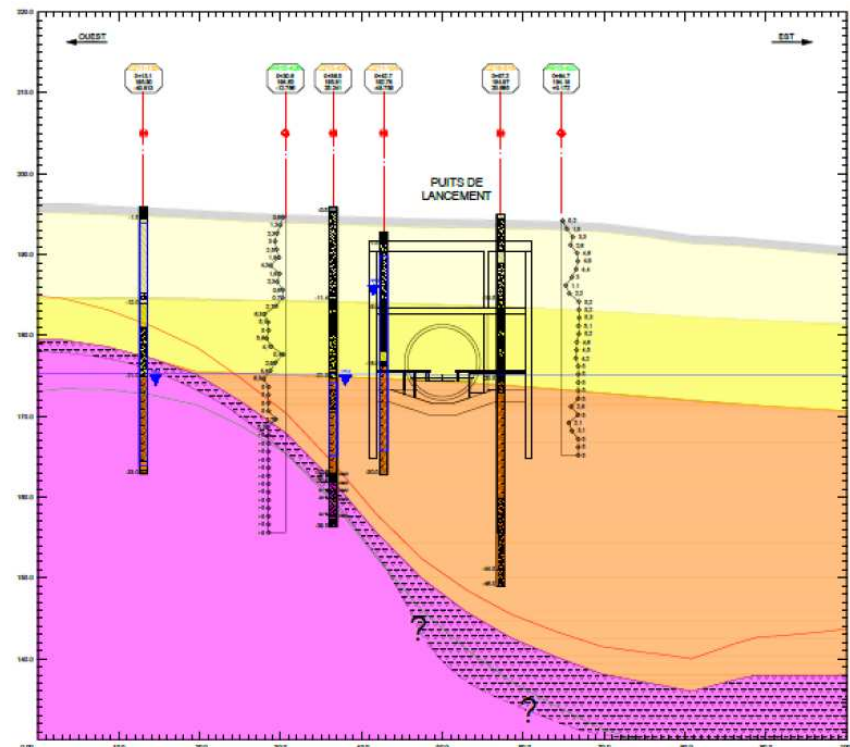
vert : Sable limono-argileux.



L'incertitude sur la positions des interfaces conduit à une incertitude sur définition des procédés utilisables:

Imprégnation des sols granulaires  
Semi substitution des formations sablo argileuses,  
Approfondissement et ancrage des parois PM.

confère figure 1



## Doc SBY Injection de compensation EOLE CNIT





## 2.4. Gestion des risques techniques GT32.

La prise en compte et le partage des risques techniques, dans la réalisation d'un projet, requiert une adaptation de la démarche des intervenants à l'acte de construire:



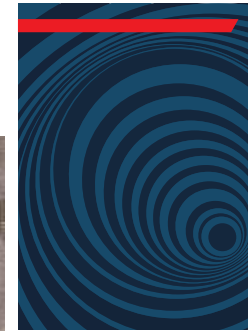
Prise de conscience à l'origine du projet de la nature de l'ouvrage, son environnement et définition des travaux géotechniques spéciaux nécessaires à la réalisation.

, Evaluation du niveau de risque en fonction de la typologie des formations:

- a) Formations granulaires – (Sables, Graves sableuses ou limoneuses).
- b) Formations cohérentes (Marno-calcaires).
- c) Argiles,
- d) Roches.

Le niveau de risque varie (a) Injectabilité et limites (b & d ) Maitrise quantitative

## Doc SBY L15 Sud - Forage & Injection compensation (SAS)





## 2.5. Contractualisation des prestations GT25 (MO-MOE).

La technologie retenue doit être fondée pour supporter les échanges avec l'entreprise au stade de la contractualisation.

En retenant l'injection comme procédé d'amélioration des sols pour la réalisation de l'ouvrage, les conditions de faisabilités devront être admises factuellement par tous les intervenants de l'acte de construire, de sorte valider le risque technique partagé. MO AMO (Etudes Préalables et Faisabilités) investigations initiales (G1)

MOE (Etudes AVP) investigations complémentaires (G2) et 2 PRO, connaissance du risque résiduel et approche validé au (DCE), MOE-MO-ENT la technologie retenue doit être fondée pour la contractualisation (CT), car l'entreprise doit valider les dispositions constructives et les risques techniques afférents dans le cadre d'une offre financière semi forfaitisée (GT25).



# Doc SBY Toulon ADELE Arsenal -Fond injecté Gel de silice





### 3 – Etudes AVP-PRO-DCE



### 3.1. Missions Géotechniques NFP 94500 - GT43

Le MOE dans le cadre des études (Etudes AVP) et suite à l'appropriation des données géologiques et géotechniques du projet, devra compléter la consistance des données disponibles (G1). Par ailleurs en fonction de l'évolution projet, voire de modifications de fonctionnalités, Stations, Puits, Accès et ouvrages annexes, interceptant de nouvelles formations ou constituant une nouvelle extension, de nouvelles investigations comportant des sondage et caractérisation géotechniques et hydrogéologiques seront nécessaires (G2).

En cas de changement de géologie, voire des conditions d'injectabilité, une adaptation de procédure voire un changement de procéder peut être indispensable, Une nouvelle étude pourrait être engagée au stade G2 PRO, afin, de d'assurer la maîtrise qualitative de l'objectif et du risque résiduel au stade de l'établissement du (DCE) afin de présenter une approche technique précise en vue de la consultation des Entreprises.







### 3.2. Niveau de définition Etudes AVP – G2 – PRO.

En retenant l'injection comme procédé d'amélioration de fondation ou de réalisation de l'ouvrage, les conditions suivantes doivent être validées:

a) Réduction de la perméabilité des terrains

Sols granulaires injectables,

Contraintes géostatiques suffisantes

Objectif  $k$  compatible avec matériaux retenus

Hétérogénéités compatibles ou non compatibles

b) Renforcement cohésion ou/et module déformabilité

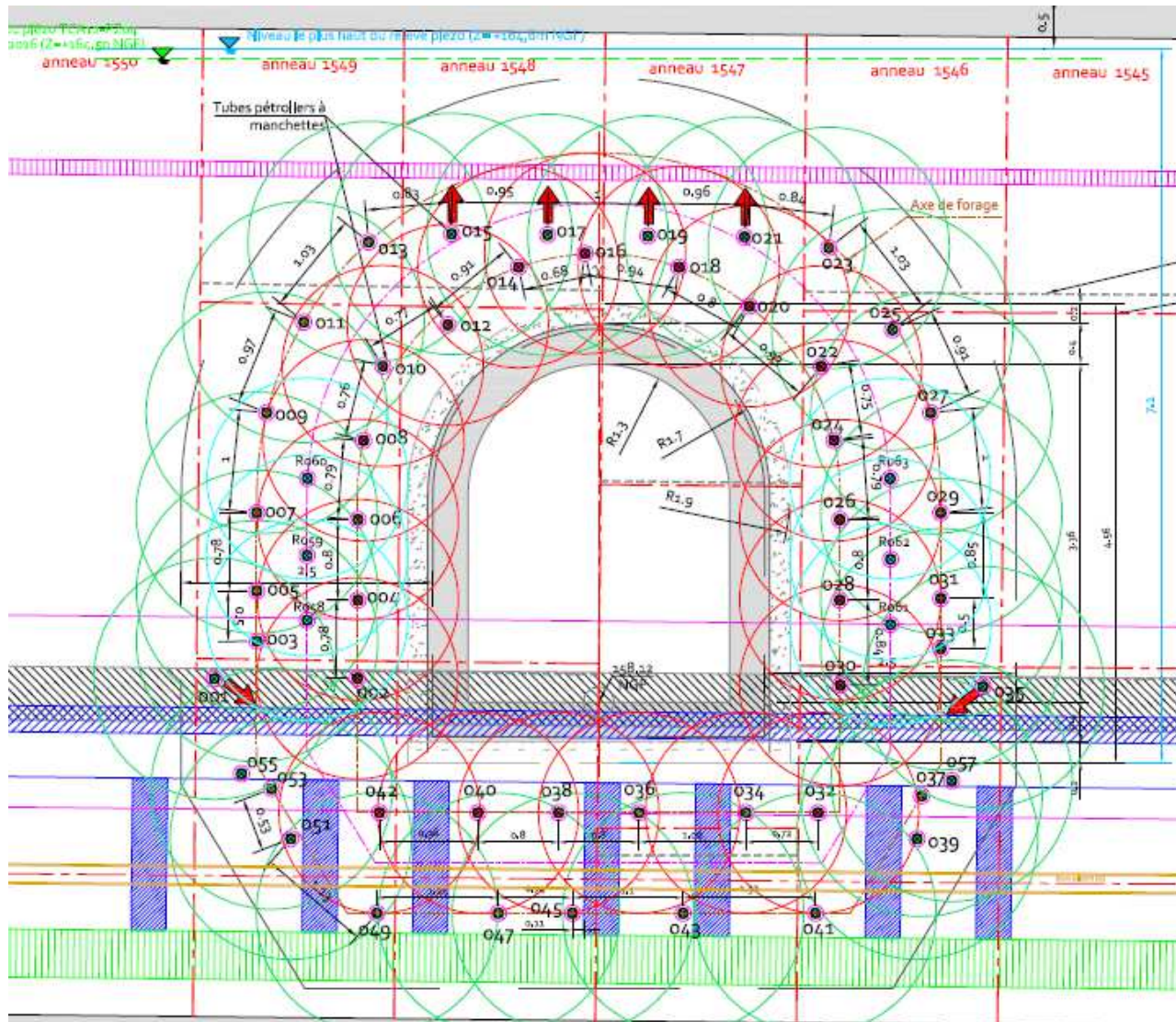
Sols granulaires injectables ou assimilés,

Contraintes géostatiques suffisantes

Objectif  $R_c/E$  compatible avec matériaux retenus

Hétérogénéités compatibles ou non compatibles,





### 3.3. Documentaire DCE

Le DCE doit se fonder sur les exigences techniques figurant à la norme EN 12715 en prenant en compte la spécificité de l'ouvrage, dont nomment  
Rappel des données géologiques et hydrogéologiques issues du cahier B  
Informations sur l'ouvrage à construire - données géométriques et altimétriques. (plans et coupes).

Données concernant le dimensionnement de l'ouvrage

Définition du procédé d'injection retenu, rôle et fonctionnalités

Méthodes de réalisation et dispositions constructives spécifiques satisfaisant aux conditions de réalisation du projet:

Méthode de forage et d'équipement pour injection.

Méthode d'injection, matériaux, séquences, suivi et validation.

Objectif à atteindre méthodes de qualification et interprétation.

Le degré d'amélioration attendu par le traitement doit être quantifié, afin d'éviter toute confusion concernant le choix des moyens techniques à mobiliser par l'entreprise pour l'exécution des travaux.





## 4 - Contrat travaux CT

## 4.1. Evaluation Offres Entreprises.

Les Entreprises établiront une offre technique détaillée et conforme aux dispositions techniques figurant au DCE, comportant :

- a) Un mémoire technique accompagnant l'offre comportant l'ensemble des moyens techniques matériels et personnels qualifiés correspondant aux dispositions constructives du DCE.
- b) Un programme des travaux comportant le détail des moyens mobilisés et la productivité assumée des différents ateliers, justifiant le respect du programme.
- c) Une offre financière établie sur la base d'un bordereau quantitatif et estimatif, correspondant aux moyens techniques et rendements figurant aux pièces précédentes.

L'évaluation des offres proposées par le GT8 (a) 30%, (b) 30%, (c) 40%





## Doc SEFI INTRAFOR BPNL train de Forage







## 4.2. Mode de rémunération GT 25 Contractualisation

Dans le cadre de l'impulsion donnée par le GT25 concernant la contractualisation des travaux Ouvrages souterrains le GT8 propose le recours à un mode de rémunération fondé sur une approche risques harmonisée entre les intervenants de l'acte de construire, soit en l'occurrence:

- a) Partie forfaitisée : Base quantitative (+/-10%).
- b) Partie variable : Risques / validation contextuelle.
- c) Parti rémunérée sur condition: Aléa géotechnique.

# Doc SEFI INTRAFOR BPNL

## Train d'injection





### 4.3. Aléas et Gestion des variations quantitatives

L'aléa est une dérive non identifiée des conditions de porosité ou d'altération d'une formation.

Il peut être constitué lorsque les données communiquées au cahier B ne permettent pas de qualifier l'étendue d'un projet de traitement au droit d'un ouvrage, car les conditions d'évaluation sont insuffisantes au regard des données disponibles.

Cette situation peut être observée dans les Marno-Calcaires (Bassin Parisien), dont le taux de traitement peut varier de 5% à 15%, pour un objectif de  $10^{-7} \text{ m/s} < k < 10^{-6} \text{ m/s}$ ,

Mais peu dériver jusqu'à 30% voire davantage à procédure constante et fonctionnelle par ailleurs,



## 5 – Contrat travaux (ENT)



## 5.1. Appropriation des données d'entrée – G2 PRO

L'Entreprise doit s'approprier & valider les données d'entrées figurant cahier B du DCE, Celui-ci comportant l'ensemble des investigations G1, G2 et synthèses

L'entreprise doit accepter et s'approprier le projet de traitement par injection et les dispositions techniques décrites au DCE, fondées sur la base de la G2PRO et d'une évaluation de l'approche risques, partagée par le MO et MOE,

Les investigations complémentaires (G3), intervenant post contractualisation, sur la base d'une connaissance géotechnique validée aux différents stades du projet, sont réalisées à titre complémentaire et titre informel,



## 5.2. Objectif des travaux - Performances et validation hypothèses

L'entreprise doit valider l'objectif fixé au DCE en accord avec les moyens techniques proposés pour la validation des hypothèses,

En cas de désaccord l'entreprise pourra proposer une méthodologie de traitement par injection alternative, respectant l'objectif du DCE et assortie d'une approche risques valide et d'une offre financière forfaitisée (GT25),





## 5.5. Méthodes & Matériaux

L'injection présente de nombreuses fonctionnalités applicables à la construction:

Puits - Parois moulées - Prétraitement par injection (coulis Ciment stabilisé, voire rigidifié).

Fond de puits – (formation graveleuse) traitement par injection (coulis Ciment stabilisé, rigidifié) injection x phases (visco-rigidité).

Traitement ouvrages courants - Puits / stations - Fonds injectés

Injection selon 2 à 4 phases principales:

1- Injection de coulis de ciment stabilisé, fluidifié

2- Injection de gels de silice + réactif minéral ou mixte .

Injection de consolidation ou compensation

,

## Doc SEFI INTRAFOR BPNL





## 5.5. Convenances - PE - Suivi production- Contrôles qualité

Chaque type de projet de traitement doit faire l'objet de convenances des propriétés rhéologiques des coulis d'injection, Le cas échéant un plot d'essai sera réalisé d'ès le démarrage pour validation de l'objectif:

Les paramètres de forages et d'injection qui constituent les données caractéristiques des conditions de confinement du terrain doivent être acquises et restituées sous forme d'analyse quantitative pour vérification en cours de travaux (suivi production) et en fin de travaux pour validation et réception,



## 6 – Suivi & Contrôle des travaux

## 6.1. Suivi travaux et contrôles (G4)

Les travaux doivent faire l'objet d'une mission G4 , portant sur la vérification de la méthodologie des travaux et l'exercice du contrôle interne, contrôle externe et les missions de contrôle extérieurs exercées par des laboratoires indépendants:

Cette démarche doit être fonctionnelle afin de déclencher la mise en œuvre de la méthode observationnelle et une intervention auprès de l'entreprise en vue de l'adaptation de la procédure d'exécution

Exemple adaptation –

a) **Dérive quantitative + action :**

Rhéologie du coulis +

Critères d'injection Pr - ou Vr –

b) **Dérive quantitative - action :**

Rhéologie du coulis – ou --

Critères d'injection Pr + ou Vr –





## Doc SEFI INTRAFOR EOLE PUIITS contrôle travaux traitement



## 6.2. Validation des objectifs - Critères de réception

### **Validation perméabilité ou conductivité**

kh – Essais d'eau ponctuels

type Lefranc (sols) type Lugeon (roche ou sols cohérents)

Mesure de vitesse écoulements au micro-moulinet

Validation k global ouvrage Vidange / remontée

Essai pompages –  $kv/kh^2$  - Pz sélectifs

### **Validation caractérisation mécanique**

Essai au pressiomètre en forage

Essai plaque cyclique horizontal - Galeries

Rc sur carottes prélevées en sondages

### **Contrôle global**

Imagerie de paroi en forage

Mesure de vitesse écoulements au micro-moulinet

**Critères de réception : 85 % à 95% de l'objectif selon type d'essai**





### 6.3. Dossier D'ouvrage

Un dossier DOE reprenant l'ensembles des données du projet depuis le DCE jusqu'au contrôle des travaux doit figurer sous forme factuelle, (fichiers Word et Excel pour interprétation,



## 7. Méthodologie - Matériels & Matériaux



## 7.1. Matériels, méthodes et équipements de forages

Mode de forage Sonic ( Dispositif de forage HF) améliorant la performance du forage en réduisant le volume de cutting et la quantité de fluide,

L'usage généralisé de la méthode d'équipement MPSP notamment au cours des projets Eole et SGP , constitue une alternative technique permettant une optimisation du traitement des terrains cohérents (M6C CH et similaires)

Traitement à pression modérée  
maîtrise des quantités est ajustement rhéologie des coulis  
Augmentation des cadences

Cette alternative MPSP limite la sur-fracturation usuelle du TAM



## 7.2. Matériaux Coulis suspensions base granulaires

Le Spinor (Origny /EQIOM) est devenu en 25 ans une alternative à l'emploi des coulis chimiques et des résines relativement peu employées en construction, en raison de leur justification limitée aux ouvrages définitifs.  
confère tableau 2 (doc EQIOM)



(valeurs indicatives)	Spinor A6	Spinor A12	Spinor A20	Ciment
GBFS %	≥ 80	≥ 80	≥ 80	0
C3A %	1,72	1,72	1,72	> 7
Masse volumique	3,00	2,90	2.92	3.1
Densité apparente	0,6	0,7	0.8	1.0
d100 (dmax 100) - μm	6	12	20	100
Finesse Blaine SSB (cm²/g)	> 16000	> 9000	> 7000	3000
Finesse BET * (m²/g)	4,168	2,476	2,174	-
* adsorption d'azote				

### 7.3. Matériaux Coulis solutions ou assimilées

Parmi les solutions techniques employées au cours des dernières années on retiendra:

a) Etanchement /consolidation - Ouvrages provisoires

Injection de sables et gravier – Gels de silice 25 à 30% avec réactif mixte

Etanchement de formation du Trias - Ouvrage définitif

Etanchement consolidation de Brèches Calcaires - Ouvrage définitif

Injection de Nano Silice (Doc SBY et Doc BASF)



## 7.4. Caractérisation et qualification des matériaux (coulis)



**Viscosité** (rhéomètre, scissomètre)

**Stabilité** (filtre presse, filtre pompe)

**Cohésion** (cohesimètre Lombardi )

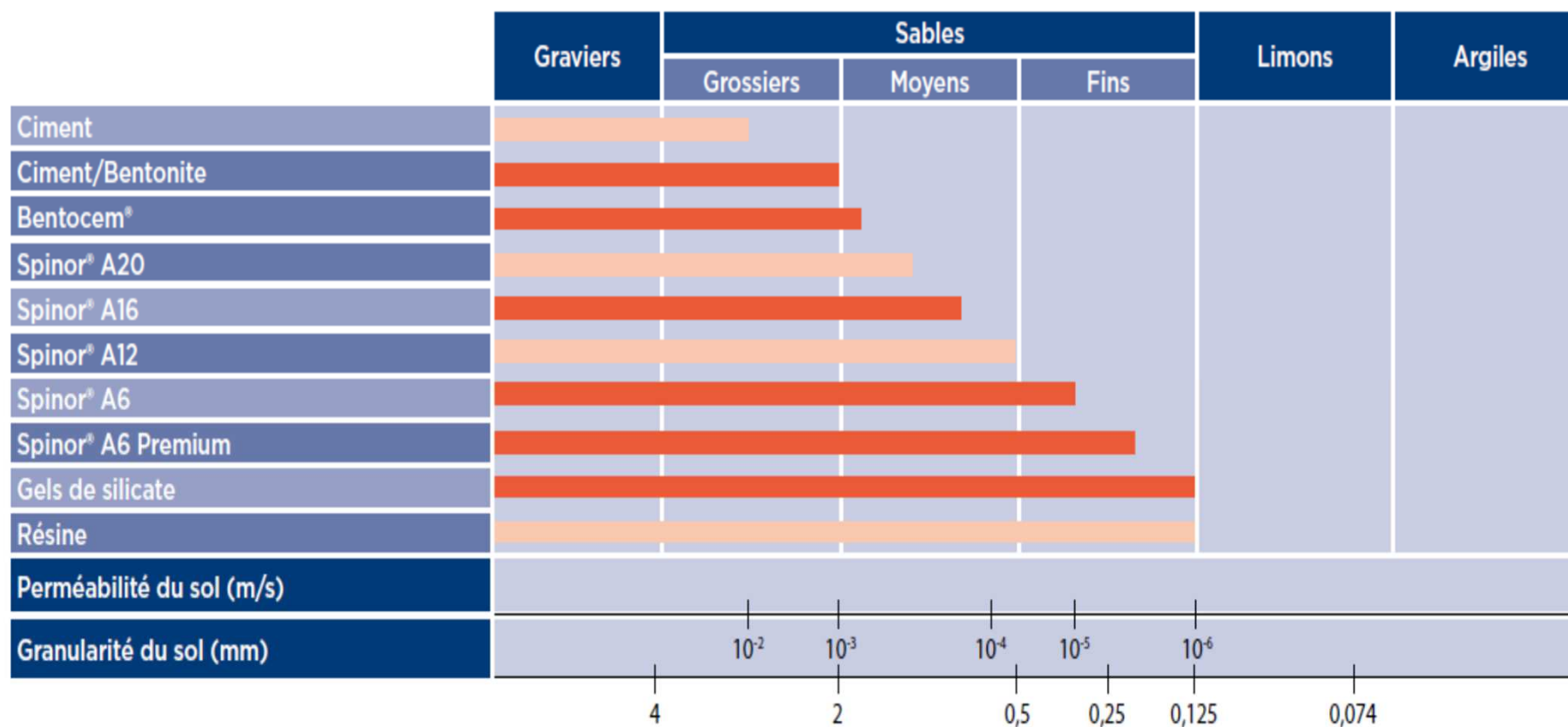
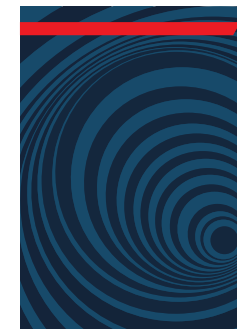
**Prise** (ultrasonic)

**Injectabilité** (colonne de sable)

**Pénétrabilité** (PTE)



## Critères et limites d'injectabilité des matériaux d'injection (Doc EQIOM)





Fin de présentation

Merci de votre attention

Hervé LE BISSONNAIS - Michel CHOPIN

AFTES GT 8