

REDUCTION DU RISQUE POTENTIEL DE LIQUEFACTION A L'AIDE D'UNE TECHNIQUE D'INJECTION

Mitigation of the liquefaction risk using grouted injection

Alexandre Hugon¹, Erell Grimault¹, Serge Lambert¹.

¹ Keller Fondations Spéciales

RÉSUMÉ – La réduction du risque potentiel de liquéfaction des sols en zone sismique est obtenue en général par l'utilisation de procédés qui permettent la densification des sols (vibrocompactage, colonnes ballastées, Compactage Horizontal Statique, ...), le drainage (drains en gravier, colonnes ballastées) ou encore le caissonnage par jet-grouting ou Deep Soil Mixing. Cependant, parfois des contraintes strictes en terme d'environnement du chantier (emprise de chantier limitée, accès, bruit, vibration, voisinage, existants instables, etc...) ne permettent pas l'emploi de ces procédés courants. Un chantier en 2019 a été réalisé sur l'île de St Barthélemy pour mettre en œuvre peut-être pour la première fois sur le territoire français, un procédé d'injection de coulis de ciment afin de supprimer tout risque de liquéfaction. La technique utilisée consiste à injecter un coulis par l'intermédiaire de tubes à manchettes scellés dans un coulis de gaine.

Ce procédé rentre dans la catégorie des améliorations de sol et est destiné dans le cas présent, à amener suffisamment de cohésion aux sables faiblement compacts pour éviter tout risque de liquéfaction sur les six premiers mètres du site. Cet article indique les paramètres à définir et à contrôler pour s'assurer de l'efficacité du procédé pour un traitement de la liquéfaction.

ABSTRACT – The mitigation of the liquefaction in seismic zones is generally obtained by the use of processes which allow the densification of soils (vibrocompaction, stone columns, Static Horizontal Compaction, ...), drainage (gravel drains, stone columns) or even casing by jet-grouting or Deep soil Mixing. However, sometimes strict constraints in terms of site environment (limited site area, access, noise, vibration, neighborhood, unstable existing buildings, etc.) do not allow the use of these current processes. A project in 2019 was carried out on the island of St Barthélemy to implement, most certainly for the first time on French territory, a cement grout injection process in order to eliminate any risk of liquefaction. The technique used consists to inject grout inside the soil. This process is a soil improvements and is intended in this case, to bring enough cohesion to the sands to avoid any risk of liquefaction on the first six meters of the site. This article indicates the parameters to define and control to ensure the efficiency of the process for a treatment of liquefaction.

1.Introduction

La limitation du risque de liquéfaction est une préoccupation permanente du concepteur qui s'oriente très rapidement vers une amélioration ou un renforcement de sol avec le soucis de retenir un procédé à la fois efficace et le moins cher dans une analyse de type coûts/bénéfices. Dès qu'un projet se situe en site exiguë, en site urbanisé ou lorsque les accès ne permettent plus l'intervention de foreuses de grand gabarit, le choix des

procédés qui traitent le problème de la liquéfaction devient très restreint. Les principaux évoqués dans le Guide de l'AFPS « Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismique » dans de tel contexte sont le procédé de Compactage Horizontal Statique (CHS) et le jet-grouting. Pourtant, il existe également un procédé performant d'injection par imprégnation. L'objet de cet article est de décrire la technique telle qu'elle est réalisée aujourd'hui et d'évoquer les paramètres à définir et à contrôler pour s'assurer de l'efficacité du procédé pour un traitement de la liquéfaction.

2.Principe et mécanisme

L'injection de coulis est souvent utilisée pour le remplissage de vide dans le sol ou le rocher avec l'objectif de réduire sa déformation, d'apporter de la cohésion au sol, d'augmenter la résistance à la compression et au cisaillement du sol ou également de couper les interconnexions hydrauliques et diminuer ainsi la perméabilité des massifs sableux ou rocheux. Les coulis sont injectés sous pression afin de remplir les pores du sol ou les fissures du rocher.

Il existe deux modes d'injection suivant la norme NF EN 12715 :

- l'injection sans déplacement de sols, par imprégnation : ce procédé remplit les vides du sol par le coulis sans réaménagement des grains et sans claquage du sol. Il est adapté aux sols pulvérulents (sables et graviers) ne comportant pas de fines.
- l'injection avec déplacement de terrain par fracturation hydraulique consiste à claquer le terrain à plusieurs reprises de manière répétitives et sélectives. Ce procédé permet d'améliorer tous types de sol (argileux et graveleux) et également dans le cas d'ouvrage existant, il peut les redresser de manière contrôlée si nécessaire.

Par la suite, nous nous intéresserons qu'aux injections par imprégnation. Il existe 2 grandes familles de coulis pour l'amélioration de sol et l'imperméabilisation des sols :

- les coulis à base de liants hydrauliques,
- les coulis chimiques.

Pour obtenir un gain de résistance, ce sont les coulis à base de liants hydrauliques qui sont en général utilisés. Ils comportent principalement un mélange d'eau, de ciment et de bentonite. La figure 3 représente le domaine d'application du ciment classique pour des éléments grossiers et du ciment ultrafin pour des sables fins.

2.1. Mise en œuvre et équipement de l'injection par imprégnation

Selon la taille et les volumes à injecter, il est important de choisir une centrale d'injection de gabarit adapté. Le plus petit modèle est une centrale d'injection qui fait à la fois malaxeur, bac tampon et qui possède une ou plusieurs pompes d'injection. Bien entendu, on peut imaginer également des silos pour stocker le ciment et des containers d'injection plus nombreux et plus imposants.

L'injection au tube à manchettes est la technique la plus utilisée car elle permet de sélectionner la tranche de terrain à traiter et d'injecter en plusieurs phases si nécessaire. L'écartement des manchettes est de l'ordre de 30 cm. Le tube en PVC est scellé dans un premier temps au terrain par l'intermédiaire d'un coulis de ciment faiblement dosé en ciment. Le coulis de gaine permet de maintenir en place le tube et évite les remontées verticales du coulis d'injection. Après 1 à 3 jours, un obturateur double est introduit dans le tube pour procéder à l'injection du sol au droit de chaque manchette. Après le claquage du coulis de gaine sous une pression de l'ordre de 30 bars environ, l'injection démarre en gérant le débit et la pression de manière à ne pas claquer le sol. Les critères d'arrêts sont

le volume théorique atteint, la pression limite de claquage du sol ou la résurgence du coulis au niveau de la plateforme de travail.



Figure 1 : exemple de centrale d'injection pour une injection par imprégnation.

2.2. Domaine d'application

Un traitement homogène dans la masse par injection d'imprégnation ne peut être obtenu que dans les sables ou graviers propres (passant à 80 µm inférieur à 10 %).

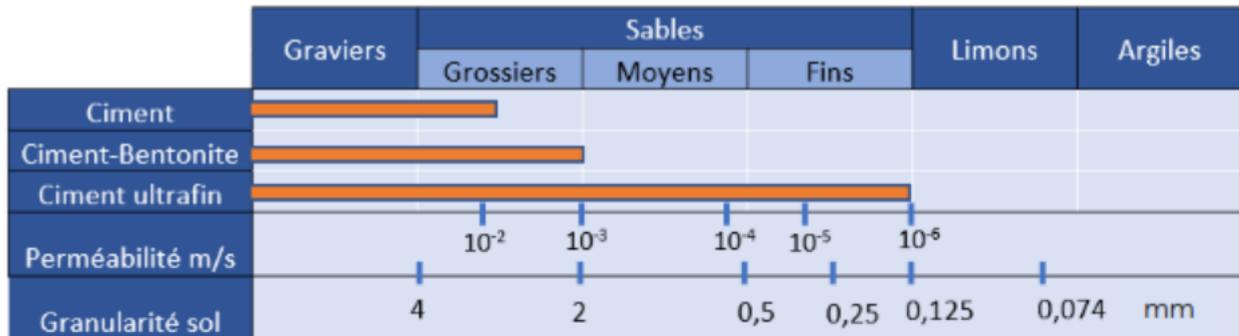


Figure 2: indicateurs d'injectabilité et limites de pénétrabilité.

2.3. Mécanisme de fonctionnement vis-à-vis de la liquéfaction

Dans le cas d'un traitement du phénomène de liquéfaction, les sols concernés par injection par imprégnation sont avant tout des sols sableux (Figure 3) sachant que les graviers ne sont pas liquéfiables et que les sols cohésifs ne sont pas injectables (sables limoneux et limons).

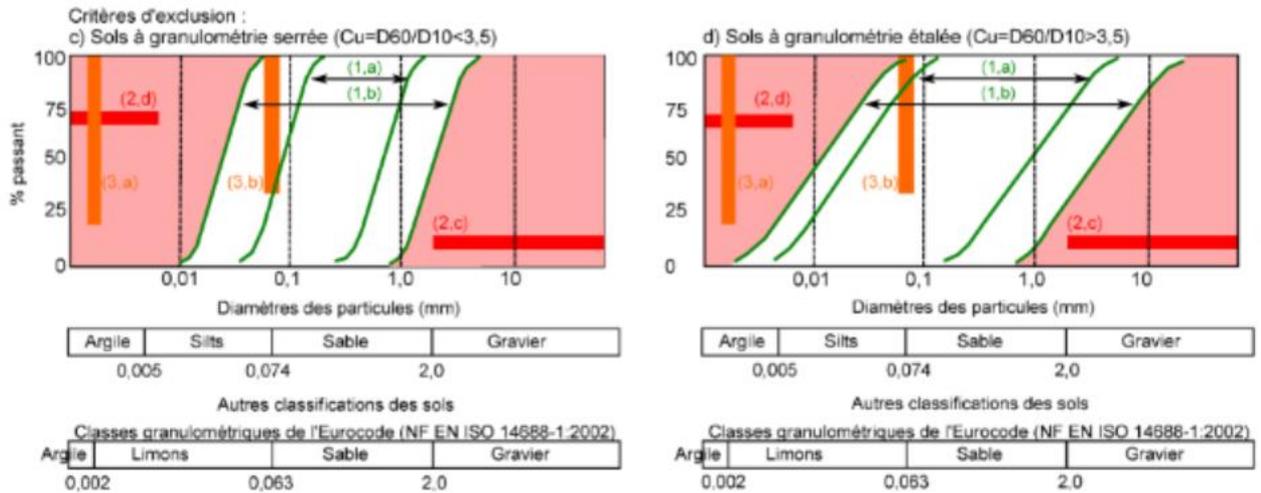


Figure 4. Critères granulométriques d'exclusion permettant de considérer les sols comme exempts de liquéfaction. (1) Critères du DGPR (2014) : (1a et b) : courbes granulométriques situés hors des fuseaux (1a) et (1b) pour les sols à granulométrie serrées et étalées. (2) Critères du PS92 permettant de considérer les sols a priori exempts de liquéfaction : (2c) diamètre D_{10} à 10% supérieur à 2 mm ; (2d) diamètre D_{70} inférieur à 74 μm , et indice de plasticité $I_p > 10\%$. (3) Critères de l'Eurocode 8 : (3a) les sables contiennent de l'argile en proportion supérieure à 20% avec un indice de plasticité $I_p > 10\%$; (3b) les sables contiennent des silts en proportion supérieure à 35% et, simultanément le nombre de coups SPT, normalisé pour l'effet de surcharge due au terrain et du rapport d'énergie, $N_{1(60)} > 20$; Des conditions complémentaires simultanées existent pour l'Eurocode 8.

Figure 3 : représentations des critères granulométriques du DGPR, du PS92 et de l'EC8 (Javelaud 2015).

L'injection de coulis de ciment permet de réduire très fortement l'indice des vides du sol traité, de chasser l'eau interstitielle et d'absorber l'eau capillaire et une partie de l'eau liée. Le sable de faible compacité perd ainsi son caractère contractant et sous les sollicitations sismiques la pression interstitielle au sein du massif n'augmentera plus ou très peu.

L'injection a également l'avantage d'augmenter les caractéristiques mécaniques du massif en lui donnant des cohésions supérieures à 100 kPa et par voie de conséquence augmente la rigidité et la résistance au cisaillement cyclique moyenne du sol en place. Pour toutes ces raisons, elle rend donc négligeable le potentiel de liquéfaction du sol traité et s'avère être une méthode de renforcement fiable vis-à-vis de la liquéfaction. La classe de sol sismique initialement S2 peut être réévaluer en A si le rocher ou une autre formation de ce type se situe à moins de 5 m de profondeur par exemple.

Pour traiter un problème de liquéfaction, le traitement par injection doit être réalisé dans la masse et doit être pérenne. Cela a pour conséquence :

- de retenir un mode d'injection par imprégnation,
- de choisir un coulis pérenne à base de liants hydrauliques car ils sont réputés pour ne pas s'altérer dans le temps moyennant quelques précautions. Il y a lieu de vérifier notamment la qualité des eaux du sol et retenir un ciment adapté au milieu. Il est d'usage également d'ajouter de la bentonite pour réduire la perméabilité du coulis et de le rendre moins sensible ainsi à l'altération chimique,
- de limiter ce type de traitement aux sables propres liquéfiables qui pourront être traités par ce procédé.

3. Exemple d'un projet traité par injection vis-à-vis de la liquéfaction

3.1. Contexte géotechnique

Les dépôts lagunaires reconnus au droit des sondages d'archives sont constitués de sables, propres (marins coquillers) à argilo-vasards. Ces sols sont totalement immergés et présents sur des épaisseurs plurimétriques. Ces sols sont susceptibles de se liquéfier en masse. Ce point a par ailleurs été mesuré par le passé (essais en laboratoire notamment) sur ces mêmes formations dans le cadre des études récentes de rénovation de la déchetterie avoisinante. Ainsi compte tenu de la catégorie d'importance IV de l'ouvrage, l'aléa liquéfaction est à considérer dans le dimensionnement.

Les différents essais de sol ont permis de mettre en évidence sous 1,5 m de remblai des sables coquillés fins à grossiers reconnus jusqu'à 6 m de profondeur maximum puis de l'argile jusqu'à la base des sondages à 10 m/TN.

Tableau 1 : caractéristiques mécaniques du sol.

Profondeurs / TN [m]		Faciès	p_i^* [MPa]	E_m [MPa]	α [-]	φ [°]	C' [kPa]	k
0,0	1,5	Recouvrement, R_{bo}	0,35	2,5	0,50	20	15	
1,5	5,7	Dépôts marins, F_{q5}	0,19	1,7	0,67	20	5	$5,9E^{-5}$
5,7	8,0	Dépôts alluviaux, $F_{q2/4}$	0,19	1,7	0,67	20	5	$2,7E^{-7}$
8,0	13,5	Argile, A_aV_1 et A_aV_2	1,26	7,4	0,50	25	30	
13,5	-	Roche, S_uV_{2a}	3,44	47,5	0,33	30	60	

*valeurs modifiées par rapport à la synthèse du géotechnicien définie dans sa G2-PRO

Le suivi piézométrique sur 1 mois indique une variation faible du niveau d'eau qui se situe à 1,40 m de profondeur par rapport au TN.

La perméabilité a été mesurée à l'aide d'essais d'infiltration de NASBERG. A partir des analyses granulométriques et de l'essai CPTu, la perméabilité par couche a également pu être estimée (Tableau 2).

Tableau 2 : perméabilité de sol.

	F_{qs} (m/s)	$F_{q_{4a/2}}$ (m/s)
K Nasberg	$4,3 E^{-5}$	$4,9 E^{-7}$
K* Hazen	$8,7 E^{-5}$	$1,3 E^{-7}$
K* Robertson	$4,8 E^{-5}$	$2,1 E^{-7}$

Pour le dimensionnement du projet, la perméabilité moyenne retenue dans la couche de sable F_{q5} est de $5,9E^{-5}$ m/s (variable en fonction de la profondeur entre $1,66 E^{-6}$ m/s et $1,98 E^{-4}$ m/s d'après les mesures de Hazen).

Les granulométries et les mesures de perméabilité ont orienté le choix de ciment vers un ciment Ultrafin (Figure 3) .

3.2. Principe de fondations

Le projet prévoit la construction d'un réservoir hors sol en béton armé d'environ 17,8 m de longueur, 6.8 m de largeur et 8.4 m de hauteur. Il est destiné à recevoir de l'eau potable issue d'un traitement dans l'usine principale mitoyenne pour une hauteur d'eau d'environ 7.0 m. Le radier de l'ouvrage devrait quant à lui être calé plus ou moins vers le niveau du terrain naturel actuel (Figure 4).

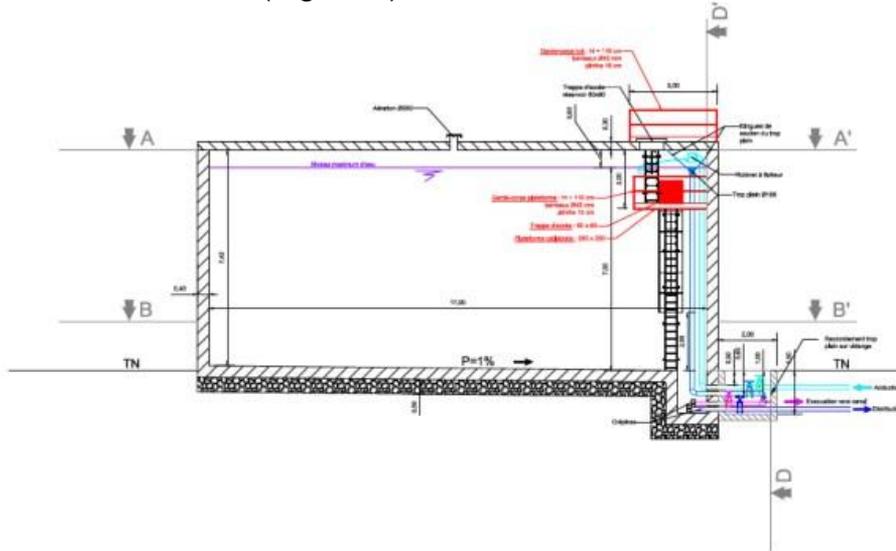


Figure 4 : coupe du réservoir.

Compte tenu des épaisseurs importantes de sables susceptibles de se liquéfier, une amélioration de sol s'impose dont le choix du procédé doit intégrer l'environnement industriel du projet et la présence de constructions mitoyennes. Les méthodes classiques de traitement de la liquéfaction générant des vibrations (colonnes ballastées, vibro-compactage) apparaissent mal adaptées ici. Il en sera de même des fondations profondes sur pieux du fait de l'exiguïté du site et de la quasi impossibilité de réaliser les amenés replis des machines de forage de pieux jusqu'au centre-ville de Gustavia.

Un autre paramètre structurel de ce projet a dû être pris en compte pour le choix final du procédé. Les études structurales ont en effet montré que les déplacements de l'ouvrage sous séisme doivent être compatibles avec les contraintes spatiales du site et notamment les ouvrages de l'usine directement contiguës au réservoir projeté. Le mode de fondations finalement retenu pour répondre à toutes ces contraintes est un radier nervuré fondé sur un sol amélioré dans la masse par injection d'imprégnation. Une autre solution de compactage des sables par Compactage Horizontal Statique aurait également pu être envisagée mais le niveau de compactage n'aurait pas été suffisant pour réduire suffisamment les déplacements dans ce cadre bien précis. Les objectifs du procédé d'injection par imprégnation est d'assurer une portance de 0,2 MPa aux E.L.S. et 0,33 MPa aux E.L.U. et une limitation des tassements à moins de 3 cm en absolu et 1,5 cm en différentiel.

3.3. Dimensionnement

La première étape dans le dimensionnement de ce type de procédé est de définir les caractéristiques mécaniques améliorées nécessaires pour assurer la portance (aux ELS/ELU/ELU sismique) et limiter les tassements (cf. §3.2). De plus, une étude spécifique du débord de traitement nécessaire pour assurer la stabilité de l'ouvrage a été effectuée. Dans notre cas, ces objectifs en terme de caractéristiques de sol à atteindre après amélioration de sol par injection sont un $PI \geq 0,7$ MPa et $EM \geq 12,0$ MPa. La résistance du coulis devant atteindre une résistance supérieur ou égale à 0,8 MPa.

Les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel Plaxis 2D. Le massif du sol traité est modélisé avec un modèle de comportement de type Mohr Coulomb. Les autres couches sont modélisées avec un modèle de type HS Small afin de prendre en compte l'évolution des caractéristiques du sol suivant son état de contrainte et l'augmentation du module du sol pour de très faibles déformations. Le tassement sous la charge de l'ouvrage est estimé à 2,8 cm inférieur aux objectifs de 3 cm (Figure 5).

Pour la vérification du débord de traitement quasi inexistant en raison de l'environnement, une estimation des tassements du sol liquéfiable a été faite par une méthode analytique (Zhang, G., Robertson, P.K., Brachman, R., 2002) au préalable et a donné un tassement de 7,5 cm. Ce tassement a ensuite été pris en compte dans le modèle Plaxis pour évaluer l'incidence sur l'ouvrage (Figure 6). Il est apparu que les tassements de l'ouvrage par la liquéfaction du sol autour reste acceptable avec 2 cm de tassement absolu supplémentaire d'autant plus que le différentiel entre le bord et le centre du radier se limite à moins d'un demi-centimètre.

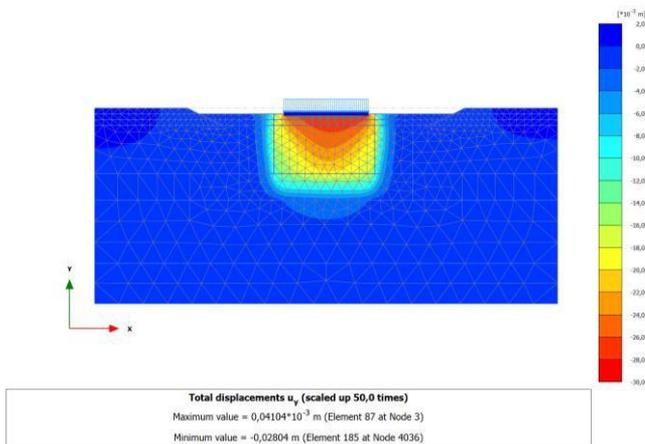


Figure 5: résultats Plaxis 2 D : Tassement de l'ouvrage.

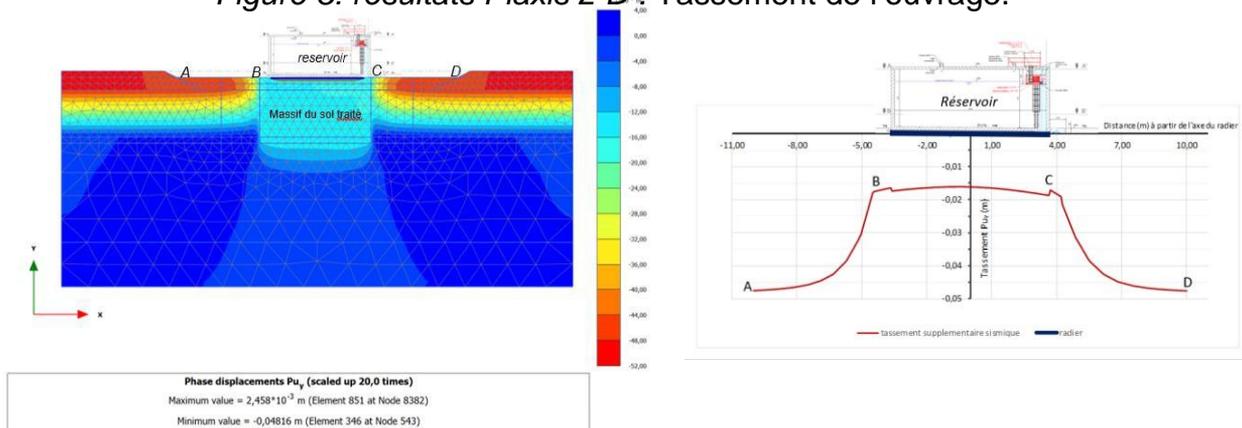


Figure 6: résultats Plaxis 2 D : Etude du débord de traitement.

3.4. Contrôles

Une planche d'essai a été réalisée au démarrage du chantier comportant des dégarnissages, des carottages et des essais pressiométriques. Les dégarnissages ont permis de vérifier l'homogénéité de l'injection suite à un traitement dans la masse avec des manchettes. Les caractéristiques mécaniques du sol injecté ont été validées par des écrasements d'éprouvettes issus du carottage et des essais pressiométriques.

En court de réalisation, nous avons équipé la centrale d'injection d'un enregistreur de paramètres Jean Lutz (BAPMC 160). Celui-ci permet d'enregistrer et de visualiser en direct les temps d'injection, la pression d'injection, le volume et le débit. L'exploitation de ces enregistrements a été réalisée par un logiciel de traitement des données qui permet de présenter l'ensemble de ces informations de manière graphique et de vérifier que toutes les manchettes sont injectées conformément au marché.

4. Conclusion

La solution d'amélioration dans la masse par injection d'imprégnation présente de nombreux avantages tels que possibilité d'intervenir dans des milieux exigües voire même à l'intérieur d'ouvrage, suppression complète du risque de liquéfaction, forte augmentation des caractéristiques mécaniques qui permet éventuellement de modifier la classe de sol sismique. Enfin, l'étude a montré qu'il est possible de s'affranchir de débord avec ce procédé.

Références bibliographiques

- Javelaud E. (2015) Etat de l'art des méthodes d'évaluation du risque de liquéfaction. Cas des ouvrages à risques normal et spécial en France. 9eme colloque National de l'AFPS Marne-la-Vallée 30//11/2015.
- Maalej Y. (2007). Comportement mécanique du sol injecté par imprégnation par coulis de ciment. Etude expérimentale et modélisation micromécanique – Thèse de doctorat de l'école nationale des Ponts et Chaussées.
- Stadler G (2004). Ground Improvement Chapter 4, Cement grouting 2eme M. P. Moseley, K. Kirch Edition Spon Press.
- Tailliez S. (1998). Etude expérimentale du comportement mécanique des sols granulaires injectés, Thèse de doctorat, Ecole centrale Paris, 1998.
- Zebowitz S., Krizek R.-J., Atmatzidis D.-k (1989). Injection of fine sand with very fine cement grout. Journal of Geotechnical Engineering, vol 115, n°12, pp1717-1733.
- Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2002, Estimating Liquefaction Induced Ground Settlements from the CPT, Canadian Geotechnical Journal, 39: pp 1168-1180.