

TRAITEMENT ANTI-LIQUÉFACTION PAR INJECTION SOLIDE REFOULANTE DANS DES DEPOTS DE LAGUNE

ANTI-LIQUÉFACTION TREATMENT BY COMPACTION GROUTING IN COASTAL LAGOON DEPOSITS

Fanny MAUCOTEL¹, Julien DEVYNCK¹, François PLOUVIER¹, Killian COGHLAN¹
¹ MENARD, Orsay, France

RÉSUMÉ – A Saint-Barthélemy (aléa de sismicité fort), Menard a réalisé un traitement anti-liquéfaction par injection solide refoulante (ISR) dans des dépôts de lagune. Cette technique permet de compacter le terrain latéralement par injection contrôlée d'un mortier sous pression. Une campagne d'essais avant et après traitement a été effectuée pour justifier l'augmentation du niveau de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction par l'effet de densification.

ABSTRACT – In Saint-Barthélemy (strong seismic hazard), Menard has performed an anti-liquefaction treatment by compaction grouting (ISR) in coastal lagoon deposits. This technique enables to compact laterally the surrounding ground by pumping a grout under pressure. An investigation test campaign has been carried out before and after treatment in order to prove the increase in the level of safety with regard to liquefaction by the effect of densification.

1. Introduction

Le projet Tree House situé au lieu-dit « Gustavia » à Saint-Barthélemy est un ensemble de trois bâtiments (Maison de type R+1, Atelier 1 de type RDC avec un niveau de sous-sol et Atelier 2/Salon de type R+1) et d'une piscine (Figure 1). Le niveau de rez-de-chaussée des différents bâtiments est calé environ à la cote du terrain naturel actuel.

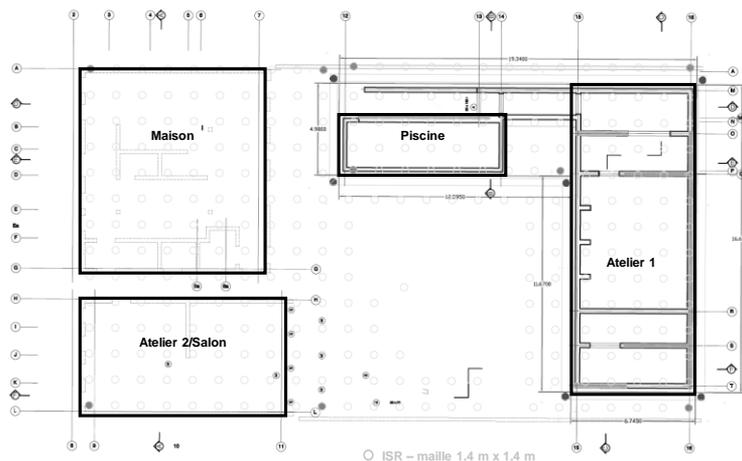


Figure 1. Vue en plan du projet

L'ensemble immobilier appartient selon les Eurocodes structuraux à la catégorie de durée d'utilisation de projet n°4, correspondant à une durée d'utilisation de 50 ans, et à la classe de conséquence CC2, dans laquelle les conséquences sont moyennes en termes

de perte de vie humaine, conséquences économiques, sociales ou d'environnement considérables.

A proximité immédiate du front de mer, le terrain de 650 m² est situé dans une ancienne zone de lagune comblée de nos jours et bordée par des mornes volcaniques escarpés. Le plan de prévention de la commune signale que cette zone présente un aléa liquéfaction. Ce dernier apparaît sur une épaisseur de sol non négligeable.

L'article présente les conditions géotechniques et sismiques ainsi que la solution d'amélioration de sol retenue pour le traitement anti-liquéfaction. Dans un second temps, il se concentre sur l'un des effets d'atténuation de la liquéfaction confirmé via une campagne d'essais par pénétromètre dynamique avant et après traitement.

2. Conditions géotechniques

Une campagne de reconnaissances géotechniques a été réalisée sur le site en phase Avant-projet de l'étude géotechnique de conception (G2-AVP) en 2014. Un sondage complémentaire a également été effectué en phase Projet de l'étude géotechnique de conception (G2-PRO) en 2019. Les investigations géotechniques comprenaient des essais in situ (un sondage pressiométrique avec 10 mesures, deux sondages de pénétration statique à pointe électrique avec mesures des pressions interstitielles et un sondage de reconnaissance à la tarière) et des essais en laboratoire (un essai au bleu de méthylène et une analyse granulométrique). Elles ont mis en évidence le profil de sol suivant (Tableau 1) :

- Des remblais de recouvrement (Rb0) jusqu'à environ 1.4 m / TN lorsqu'ils existent ;
- Des dépôts de lagune sablo-argileux (Fq5) jusqu'à environ 5.6 m à 7.2 m / TN ;
- Une frange de démantèlement argileuse (AaV3) jusqu'à environ 11.6 m / TN ;
- Un substratum microdioritique (SuV3b) au-delà.

Au droit des sondages de reconnaissances, le toit de la nappe phréatique a été relevé entre 0.8 m et 1.8 m / TN.

Tableau 1. Profil géotechnique

N°	Couche	Toit de la couche [m / TN]	Epaisseur [m]	E_M [MPa]	p_i^* [MPa]	α [-]	E_γ [MPa]	γ [kN/m ³]	q_c [MPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]	c_u [kPa]	V_s [m/s]
1	Fq ₅	0	5.6 à 7.2	3.3	0.36	1/3	9.9	19.9	2.3	25	5	-	335
2	AaV ₃	5.6 à 7.2	4.4 à 6	12	1.14	1/2	24	19	2.9	25	25	165	670
3	SuV _{3b}	11.6	-	198	4.01	1/2	396	24	-	35	35	525	1975

Les dépôts lagunaires Fq₅ ont été identifiés susceptibles de se liquéfier en masse. Les sondages ont révélé que leur épaisseur croît du Sud vers le Nord de 5.6 m à 7.2 m / TN.

3. Conditions sismiques

Les conditions sismiques du site naturel sont d'après l'Eurocode 8 :

- Zone de sismicité = 5 (Aléa fort) → Accélération maximale de référence $a_{gr} = 0.3g$ pour une période de retour de référence de 475 ans ;
- Magnitude conventionnelle $M_w = 7.5$;
- Catégorie d'importance de l'ouvrage = II (habitation individuelle) → Coefficient d'importance $\gamma_I = 1$ (période de retour égale à la période de retour de référence) ;

- Accélération horizontale de calcul : $a_g = \gamma_I \times a_{gr} = 0.3g$;
- Classe de sol = E (profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions reposant sur un matériau plus raide) → Coefficient d'amplification de site $S = 1.4$ pour une zone sismique 5 ;
- Accélération horizontale maximale du sol en surface : $a_{max} = a_g \times S = 0.42g$.

Le traitement de sol par colonnes d'ISR confère au sol traité une amélioration de ses caractéristiques mécaniques, notamment une augmentation du module de cisaillement et donc une augmentation de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement $v_{s,30}$. Après traitement par ISR, la classe de sol a donc été revalorisée :

- Classe de sol = C → Coefficient d'amplification de site $S = 1.15$ pour une zone sismique 5 ;
- Accélération horizontale maximale du sol en surface : $a_{max} = a_g \times S = 0.345g$.

4. Traitement anti-liquéfaction par ISR

Pour pallier le risque de liquéfaction présent dans les dépôts de lagunes, la construction du projet immobilier requiert le traitement de ces derniers sur l'ensemble du projet. Compte tenu de l'exiguïté du site et de la présence de bâtiments mitoyens, des solutions de fondations profondes ou générant des vibrations (vibrocompactage, colonnes ballastées) n'étaient pas adaptées. Menard a ainsi proposé la réalisation d'une solution d'amélioration de sols par un réseau d'injections solides refoulantes (ISR).

4.1. Présentation de la solution d'amélioration de sols par ISR

L'Injection Solide Refoulante (ISR) est une technique d'amélioration de sol par injection contrôlée, dont l'objectif principal est de compacter le terrain dans la masse. Le traitement est réalisé par injection d'un mortier sous pression qui refoule le sol autour de la pointe d'un outil de forage sur un certain volume, ce qui se traduit par un compactage du sol.

Les colonnes d'ISR sont des cylindres verticaux de mortier réalisés dans le sol par la pointe d'un outil de forage. Cet outil creux achemine un mortier sous la pression d'une pompe jusqu'à son extrémité. En procédant par injections successives au cours de la remontée de l'outil, une colonne est obtenue et le sol initial entourant cette colonne est fortement comprimé sur toute la hauteur traitée (Figure 2).

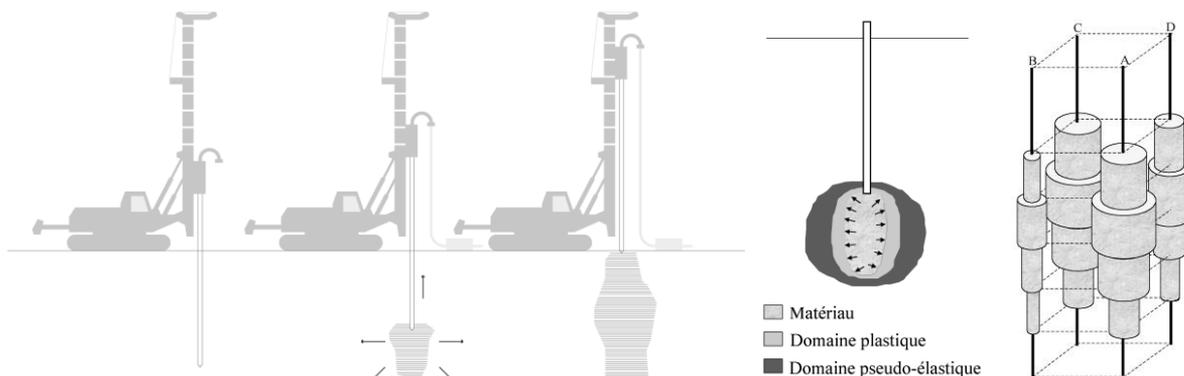


Figure 2. Schéma de principe de réalisation des colonnes d'ISR

Pour le traitement de tout un volume de sol, les travaux d'ISR seront généralement réalisés selon une série de maillage primaire, secondaire et parfois tertiaire.

Le terrain est refoulé à la descente par l'outil de forage autour du diamètre de cet outil (généralement 200 – 300 mm). A la remontée de l'outil, un refoulement complémentaire du sol est obtenu grâce à la pression exercée par le mortier d'injection mis en œuvre par la pompe située en surface.

Le maillage est généralement carré en raison de la réalisation en plusieurs phases, ce qui ne serait pas possible avec un maillage triangulaire. Les points d'injection de première phase permettent de stabiliser le terrain, et la densification la plus homogène est obtenue par la réalisation des maillages complémentaires (réalisation des forages dans l'ordre A, C, D et B dans la Figure 2).

La vitesse de remontée est modulée de manière à ce que le cylindre de mortier puisse se développer sans claquer le terrain (c'est-à-dire sans que le terrain ne se fissure et que le mortier ne vienne élargir ces fissures). Le diamètre d'expansion final obtenu engendre une densification qui varie selon la compressibilité du sol autour du forage. Le matériau utilisé est un mortier visqueux à angle de frottement très élevé. Il est constitué d'un mélange de sable, ciment, fines, eau et adjuvants, riche en sable et en filler qui présente ainsi une granulométrie très étalée.

Dans le cadre de ce projet, les colonnes d'ISR ont été réalisées sur site en utilisant un mortier ayant une résistance à la compression à 28 jours de 8 MPa avec un diamètre final de 400 mm en maille carrée 1.4 m x 1.4 m, ce qui équivaut à un taux d'incorporation de 6.4%.

4.2. Objectifs de l'amélioration de sol par ISR

L'amélioration de sols par ISR a pour but d'atténuer le risque de liquéfaction présent dans les dépôts de lagunes. Les colonnes d'ISR ont ainsi été descendues jusqu'au toit des argiles de démantèlement AaV₃.

De manière générale, le risque de liquéfaction concerne les sols granulaires lâches et donc contractants (1), soumis à des contraintes de cisaillement (2).

Par rapport à ces deux causes de risque, il existe 2 approches classiques pour traiter les sols susceptibles de liquéfier en cas de séisme par ISR :

- 1) densifier le sol : après réalisation des colonnes d'ISR, l'indice des vides est réduit. Le sol devient plus dense et perd son caractère contractant au profit d'un comportement dilatant.
- 2) réduire la contrainte de cisaillement appliquée sur le sol grâce à l'incorporation d'éléments de renforcement (colonne d'ISR), ce qui équivaut à dire que le module de cisaillement du sol amélioré est augmenté. Une partie de la contrainte de cisaillement générée par le séisme transite dans ces éléments, la contrainte agissant sur le sol en place en est d'autant réduite.

Dans le cadre de cet article, seul l'effet de densification est étudié par la suite.

4.3. Densification du sol théorique

La présence d'un réseau de colonnes d'ISR dans le sol permet de compacter le sol par refoulement (cf. section 4.1), ce qui permet de réduire l'indice des vides et donc augmenter la densité relative. Le risque de liquéfaction est ainsi diminué.

La densification du sol naturel après la réalisation des colonnes d'ISR est traduite par une augmentation de densité relative (ΔD_r) théorique :

$$\Delta D_r = \frac{\Delta e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{e_0 - e_f}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

Δe est la réduction de l'indice des vides. e_0 , e_f , e_{\min} , e_{\max} sont respectivement l'indice des vides initial (état naturel avant traitement par ISR), final (après traitement par ISR), minimal (état le plus compact) et maximal (état le plus lâche) du sol. La réduction de l'indice des vides est fonction de la compacité initiale du sol (e_0), et du taux d'incorporation des colonnes d'ISR (α) :

$$\Delta e = \alpha(1 + e_0) \quad (2)$$

Des équations (1) et (2), nous pouvons en déduire :

$$\Delta D_r = \frac{\alpha(1 + e_0)}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (3)$$

Ainsi la densité relative finale (D_{rf} , après traitement par ISR) théorique vaut :

$$D_{rf} = D_{r0} + \Delta D_r \quad (4)$$

D_{r0} est la densité relative initiale du sol en place (avant traitement par ISR) et est définie par l'expression théorique suivante :

$$D_{r0} = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (5)$$

Les essais d'identification de sol effectués sur un échantillon de sable argileux Fq₅ à 2.4 m de profondeur ont montré une teneur en eau entre 26% et 29% et un coefficient d'uniformité de 11.3. Les sables argileux étant saturés ($S_r = 100\%$), nous avons calculé d'après les relations existantes entre les paramètres d'état du sol une valeur théorique e_0 entre 0.7 et 0.78 en considérant un poids volumique des grains de 27 kN/m³. Les valeurs e_{\min} et e_{\max} ont été estimées respectivement à 0.49 et 0.92 à partir des relations établies par Youd (1973) avec l'indice de sphéricité / forme des grains (supposé ici angulaire) et le coefficient d'uniformité C_u . Il en résulte les plages de valeurs théoriques suivantes :

- $D_{r0} = 32\% - 51\%$ de l'équation (5) ;
- $\Delta D_r = 25\% - 27\%$ de l'équation (3) ;
- $D_{rf} = 58\% - 76\%$ de l'équation (4).

A partir de la densité relative initiale (D_{r0}) théorique, la résistance en pointe (q_c) a été déterminée à l'aide de la corrélation de Jamiolkowski (1985). Ces résultats ont été comparés avec les valeurs de résistance issues des sondages de pénétration statique à pointe électrique effectués sur site lors de l'étude géotechnique de conception (Figure 3). La comparaison montre des valeurs q_c ayant le même ordre de grandeur.

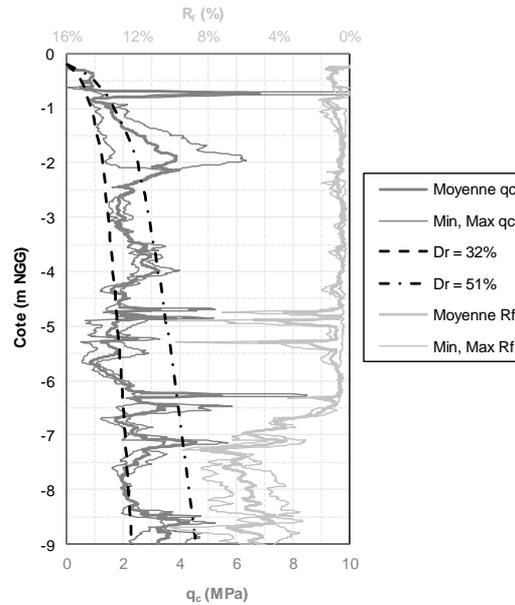
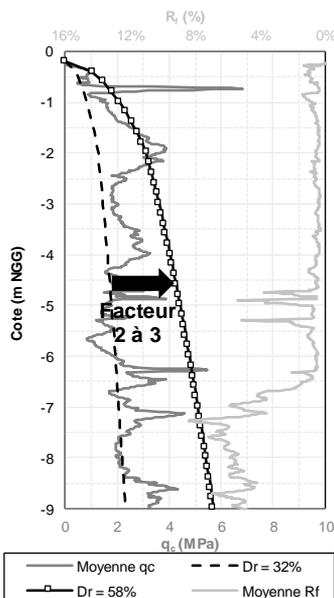


Figure 3. Comparaison de la résistance en pointe entre valeurs in-situ (traits pleins) et valeurs issues de la corrélation de Jamiolkowski (1985) (traits discontinus)

En conséquence, il a été admis que la résistance en pointe (q_c) basée sur la densité relative finale théorique (Dr_f) donnait des résultats réalistes en utilisant la corrélation de Jamiolkowski (1985). Nous avons ainsi prédit qu'un taux d'incorporation de 6.4% devrait être en mesure d'augmenter la valeur q_c d'un facteur 2 à 3 (Figure 4).

(a) Pour $Dr_0 = 32\%$ et $Dr_f = 58\%$



(b) Pour $Dr_0 = 51\%$ et $Dr_f = 76\%$

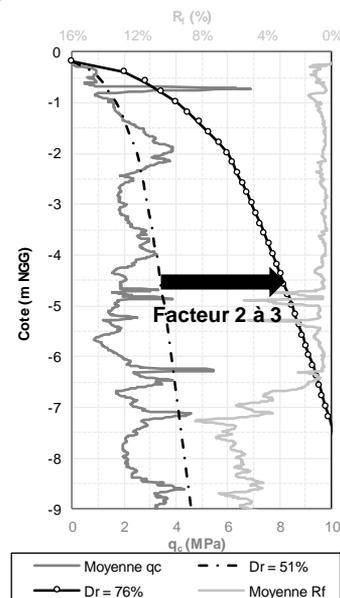


Figure 4. Comparaison de la résistance en pointe avant (traits discontinus) et après traitement ISR (traits continus avec marqueurs) calculée avec la corrélation de Jamiolkowski (1985)

5. Réception des travaux

La réception des travaux d'ISR s'appuie sur une campagne de sondages au pénétromètre dynamique avant (en juillet 2019) et après traitement ISR (en août 2019). Cette

campagne a pour objectif de mesurer et justifier le facteur de densification (2 à 3), donc de manière implicite celui du niveau de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction.

Six sondages au pénétromètre dynamique ont été réalisés avant et après travaux à proximité des points de sondages in-situ de l'étude géotechnique de conception. Les essais au pénétromètre dynamique ont été exécutés au centre de la diagonale d'une maille, ceux après traitement ISR étant à proximité des essais avant traitement. Ces sondages ont permis de définir les résistances en pointe q_{d0} moyen des sols en place à l'état initial et q_{df} moyen final (après ISR).

La Figure 5 montre une comparaison entre les résistances q_{d0} et q_{df} qui permet de conclure sur le facteur de densification atteint suite au traitement ISR. Tout d'abord, le sondage PD1 (présentant des résultats pour des durée de 1 et 7 jours après traitement) met en évidence que l'augmentation de la résistance en pointe q_{df} après traitement est obtenue quasi-immédiatement (pas d'évolution significative entre 1 et 7 jours).

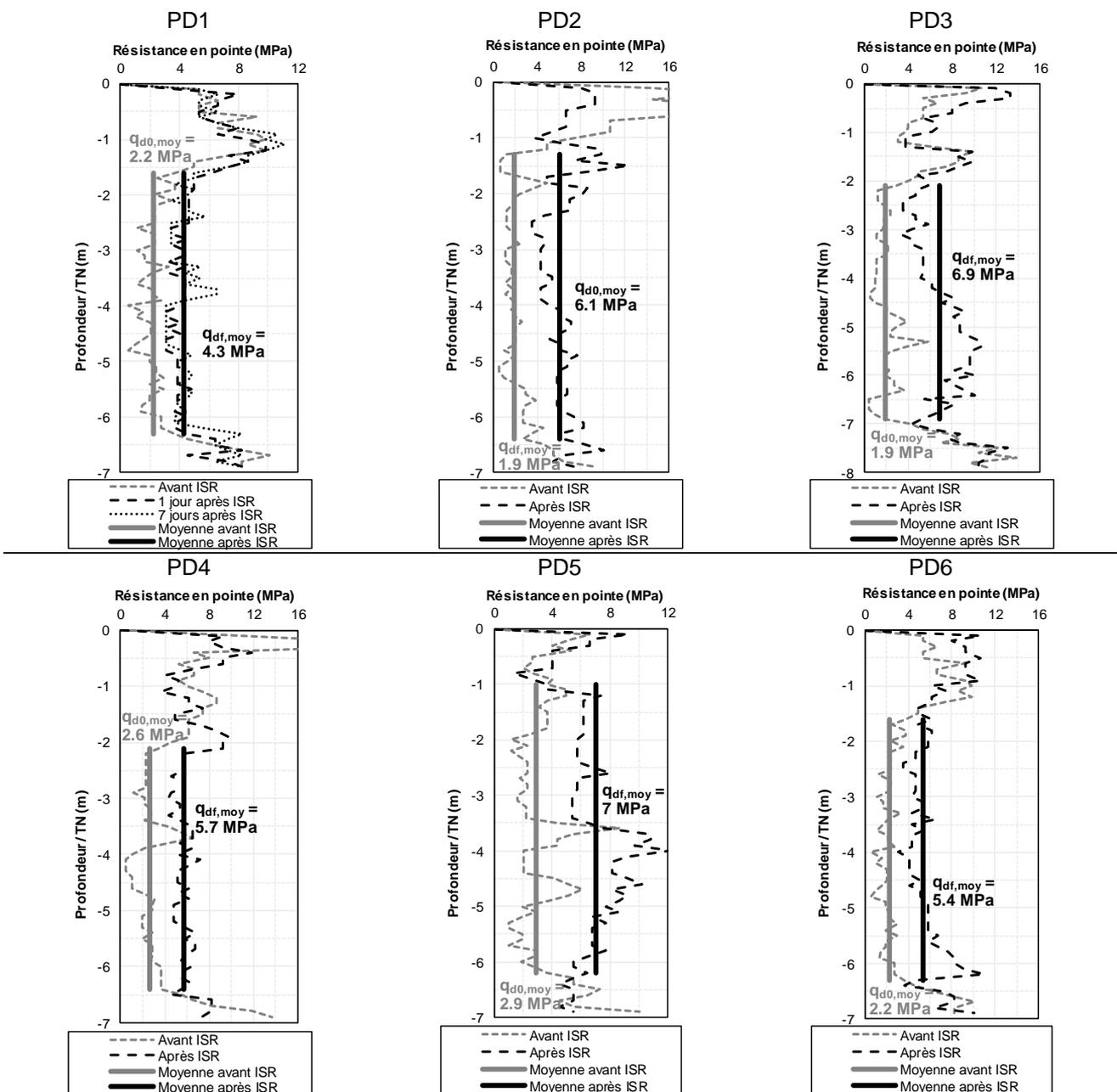


Figure 5. Comparaison de la résistance en pointe q_d avant (couleur grise) et après traitement ISR (couleur noire)

La valeur moyenne de résistance en pointe avant ISR q_{d0} vaut entre 1.9 MPa et 2.9 MPa sur la hauteur des horizons à traiter, alors que celle après ISR q_{df} vaut entre 4.3 MPa et 7 MPa. Les essais au pénétromètre dynamique avant et après traitement confirment ainsi qu'un taux d'incorporation de 6.4% permet d'obtenir un facteur de densification entre 1.95 et 3.6 (moyenne de 2.6).

6. Conclusions

A Saint-Barthélemy (aléa de sismicité fort), un traitement anti-liquéfaction a été réalisé en colonnes d'Injection Solide Refoulante descendues à la base de la couche de dépôts lagunaires sablo-argileux Fq_5 (identifiés liquéfiables). Les colonnes de diamètre 40 cm ont un entraxe de 1.4 m en maille carrée, équivalent à un taux d'incorporation de 6.4%.

L'amélioration de sols par ISR permet d'atténuer le risque de liquéfaction présent dans les dépôts de lagunes via 3 principaux effets : revalorisation de la catégorie de sol, densification du sol et réduction des contraintes de cisaillement. Cet article s'est concentré sur l'effet de densification. Il prouve à travers une campagne d'essais au pénétromètre dynamique avant et après travaux la validité de cette solution car elle rend possible la densification (augmentation de la résistance en pointe). De plus, le facteur de densification estimée de manière théorique concorde avec la réalité (celui calculé à partir des sondages pénétrométriques avant et après traitement).

7. Références bibliographiques

- AFPS, CFMS (2012). Procédés d'amélioration et de renforcement des sols sous actions sismiques.
- Jamiolkowski M. et al. (1985). New developments in field and laboratory testing of soils. State-of-art report. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco. 1: 57-153.
- Norme NF EN 1990 (2003). Eurocodes structuraux. Bases de calcul des structures.
- Norme NF EN 1998-1 (2005). Eurocode 8. Calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments.
- Youd T.L. (1973). Factors controlling maximum and minimum densities of sands. Proceedings of a Conference on Evaluation of Relative Density and its Role in Geotechnical Projects involving Cohesionless Soils: ASTM STP523- EB.7744-1, Los Angeles, 25-30 June, 98-112.