

LE CAISSONNAGE EN DEEP SOIL MIXING OU EN JET-GROUTING EN ZONE SISMIQUE

GRID OF IN-GROUND SHEAR WALLS BY DEEP SOIL MIXING OR JET GROUTING AGAINST LIQUEFACTION

Léo Quirin¹, Serge Lambert¹,
¹ *Keller Fondations Spéciales, Duttlenheim, France*

RÉSUMÉ – Le caissonnage en Deep Soil Mixing (DSM) ou en jet grouting est utilisé principalement pour remédier aux effets potentiels de la liquéfaction lors d'un séisme. Le caisson constitué de tranchées en sol-ciment agit comme une boîte de cisaillement confiné qui apporte une forte augmentation de la rigidité au cisaillement face à des sollicitations horizontales. Ce type de renforcement permet de réduire la distorsion dans le sol ralentissant de ce fait la génération des pressions interstitielles à l'origine de la liquéfaction et crée une barrière avec les zones extérieures non traitées. Le principe en vigueur de conception du caissonnage vis-à-vis de la liquéfaction se fonde sur la réduction de la distorsion du sol.

Le sol renforcé par caissonnage peut être classé dans une nouvelle catégorie de sol dont les caractéristiques entraînent une réduction des sollicitations sismiques au sein de la structure. Il est même possible d'envisager un coût du renforcement de sol compensé par une diminution des coûts globaux de la construction.

Cet article récapitule les résultats des dernières recherches sur le sujet et présente une application sur deux cas concrets.

ABSTRACT – Grid of In-Ground Shear Wall by Deep Soil Mixing or jet grouting is mainly used to rectify potential effects of liquefaction during a seism. The Shear Wall is constituted of soil mixed trenches and acts like a confined shear box which brings a huge increase of shearing stiffness against horizontal stress. Such that reinforcement allows to reduce the distortion in the soil. Consequently it slows down the generation of interstitial stress which is behind liquefaction and it creates border with untreated exterior area. The design principle in use for Shear Wall regarding liquefaction is based on reduction of soil distortion.

Reinforced soil by Shear Wall may be ranged in a new category of soil whose characteristics lead to a reduction of seismic stress inside the structure. It is also possible to consider a compensation of soil reinforcement cost by a diminution of construction global cost.

This article sums up the results of last researches on the subject and shows an application on two real cases.

1 Introduction

Le principe du caissonnage consiste à réaliser un maillage perpendiculaire de voiles de colonnes sécantes réalisées par le procédé Deep Soil Mixing ou jet grouting.

L'efficacité de ce procédé en ce qui concerne l'élimination ou la réduction de liquéfaction a été confirmée pendant le tremblement de terre à Kobe en l'année 1995 (Topolnicki, 2004). Un hôtel fondé sur pieux entourés de caissons de DSM a pu être ainsi protégé des sollicitations horizontales très élevées d'un glissement (latéral spreading) vers la mer qui a endommagé les ouvrages voisins non traité. Le caissonnage seul ou combiné avec des pieux a de nombreux avantages. Sous sollicitations statiques, il réduit fortement les tassements et augmente la portance. Sous les sollicitations sismiques Il évite la liquéfaction des sols et le problème de latéral spreading (Topolnicki, 2004). Babasaki und Suzuki (1996) ont également recensé d'autres exemples dans les environs de Tokyo.

Cet article a pour objet de reprendre ces différents aspects et de les compléter par l'étude de l'incidence de ce type de renforcement de sol sur la catégorie de site.

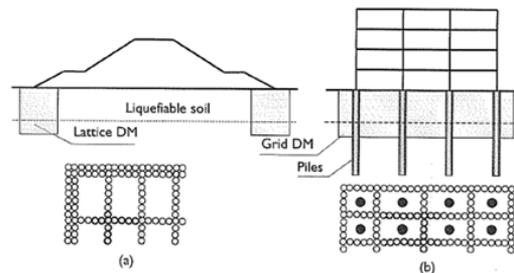


Figure 1: exemples d'application (Topolnicki, 2004).

Méthode de dimensionnement du caissonnage

Le procédé de caissonnage a fait l'objet de plusieurs études dont les résultats sont devenus une aide précieuse pour l'ingénieur chargé du dimensionnement. Les principaux résultats de ces études sont récapitulés ci-après et portent essentiellement sur la détermination du module de cisaillement équivalent du massif de sol renforcé et sur l'estimation du risque potentiel de la liquéfaction après traitement.

1.1 Caractéristique du sol amélioré

Se plaçant dans l'hypothèse du comportement élastique linéaire des constituants du sol renforcé et de l'adhérence parfaite (ce qui est légitime compte tenu du faible niveau des déformations engendrées par l'onde sismique), une étude analytique, complétée et validée par des simulations numériques (Guéguin et al., 2012), permet de définir un module horizontal équivalent du sol renforcé à partir des modules de cisaillement du renfort (DSM ou jet grouting), du sol et du taux d'incorporation.

- Limite inférieure du module horizontal équivalent :

$$G_L \geq G_{L,et}^{lb} = G_s \left[\frac{(1-\eta)}{(1-\eta) + (\sqrt{1-\eta} - (1-\eta))G_s / G_r} + (1 - \sqrt{1-\eta}) \frac{G_r}{G_s} \right] \quad (1)$$

- Limite supérieure du module horizontal équivalent :

$$G_L \leq G_{L,ct}^{ub} = G_r \left[\frac{\sqrt{1-\eta} + \frac{G_r}{G_s}(1-\sqrt{1-\eta})}{\left((\eta-1+\sqrt{1-\eta}) + \frac{G_r}{G_s}(2-\eta-\sqrt{1-\eta}) \right)} \right] \quad (2)$$

- η , taux de substitution, estimé par la formule suivante :
- t , diamètre voiles en colonnes de Deep Soil Mixing,
- m , largeur des caissons de Deep Soil Mixing,
- G_r , module dynamique des colonnes de Deep Soil Mixing, estimé à 2000 MPa (du même ordre de grandeur que la grave-ciment),
- G_s , module dynamique du sol, pris égal au module des Remblais et Formations superficielles estimés à 37 MPa.
- G_L , module horizontal équivalent du sol renforcé.

1.2 Traitement du risque de liquéfaction

La liquéfaction du sol est un processus dans lequel les sols situés sous nappes perdent temporairement la totalité ou partiellement leur résistance lorsqu'ils sont soumis à une sollicitation sismique. Typiquement, les formations géologiques sableuses lâches saturées de granulométrie uniforme sont les sols les plus susceptibles de se liquéfier.

L'étude du risque de liquéfaction débute par une évaluation de la situation initiale à partir de la méthode NCEER (2001), par laquelle est estimé un facteur de sécurité à la liquéfaction $F_{Sinitial}$ avant renforcement.

Si cette étude met en évidence des sols potentiellement liquéfiables, un renforcement de sol par caissonnage peut permettre d'augmenter le coefficient de sécurité vis-à-vis du risque potentiel de liquéfaction à une valeur supérieure ou égale à 1,25.

À partir de la méthode simplifiée de Seed et Idriss (1971) pour la détermination du CSR, N'Guyen et al. 2012 propose de déterminer l'augmentation du coefficient de sécurité du sol renforcé en introduisant un coefficient de réduction de CSR nommé R_{CSR} tel que :

$$F_{s\ final} = \frac{F_{s,initial}}{R_{CSR}} \quad (3) \quad \text{avec} \quad R_{CSR} = \frac{CSR_i}{CSR_u} = \left(\frac{a_{max,i}}{a_{max,u}} \right) \cdot \left(\frac{rd,i}{rd,u} \right) = R_{a\ max} \cdot R_{rd} \quad (4)$$

u = sol non renforcé, i = sol renforcé, rd = coefficient de profondeur,

R_{rd} = rapport de réduction des contraintes de cisaillement entre le cas de sol renforcé et non renforcé, $R_{a\ max}$ = rapport d'accélération de pic entre un sol renforcé et non renforcé. Ce rapport sans étude particulière est considéré égal à 1.

Les modélisations aux éléments finis effectuées par ce programme de recherche ont permis de constater que les caissons développent des distorsions plus faibles et des contraintes de cisaillement plus grandes que le sol en place confiné et que le voile parallèle à la direction de la sollicitation sismique se déforme moins que le voile perpendiculaire qui développe de la flexion. Le sol adjacent au voile parallèle développe

les plus faibles distorsions et les plus faibles contraintes puis augmentent en s'en éloignant. A partir de ces résultats, N'Guyen et al. 2012 proposent une relation pour estimer R_{CSR} qui inclue des facteurs d'ajustement liés à la flexion du voile perpendiculaire et la différence de déformation entre le sol et le caisson. Les facteurs d'ajustement modifient la relation proposée par Baez (1995) pour les colonnes ballastées et Durgunoglu et al (2006) pour des colonnes de sol malaxé, et permet d'estimer la réduction de contrainte de cisaillement par la présence du sol renforcé.

$$R_{rd} = \frac{1}{G_r \left[A_r C_G \gamma_r + \frac{1}{G_r} (1 - A_r) \right]} \quad (5)$$

C_G : facteur équivalent de cisaillement de l'élément de renforcement de sol qui dépend de sa géométrie ($C_G = 1 - 0,5\sqrt{1 - A_r}$),

G_r : rapport du module de cisaillement de la colonne sur celui du sol,

A_r : taux de substitution soit A_{col}/A_{maille} ,

γ_r : rapport de déformation de cisaillement entre la colonne et la déformation du sol environnant. Sur la base de plusieurs études paramétriques pour des A_r et G_r

différents, $\gamma_r = 1 - (1 - A_r)^2 \left(\frac{G_r - 1}{240} \right)^{0,4}$. γ_r est égale à 1 si le sol et les caissons se déforme de la même façon en cisaillement pur.

Modification de la classe de sol

Pour chaque projet, il convient de classer le site selon tableau 3.1 du paragraphe 3.1.2 de l'EN 1998-1 à partir de la valeur moyenne de la vitesse des ondes de cisaillement $V_{s,30}$ sur les 30 premiers mètres conformément à l'expression suivante [EC8-5 / § 3.1.2. (3)] :

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}} \quad (6)$$

expression dans laquelle h_i et v_i désignent l'épaisseur (en mètres) et la célérité des ondes de cisaillement (à un niveau de distorsion inférieur ou égal à 10^{-5}) de la i -ème formation ou couche, sur un total de N existant sur les 30 m supérieurs.

Le renforcement de sol concerne en général les sols superficiels pour lesquels il est alors nécessaire de définir la nouvelle vitesse des ondes de cisaillement. Celle-ci peut être estimée à partir de la quantification de la rigidification du système caissons/sol en estimant le module de cisaillement G équivalent du sol renforcé. La vitesse de propagation des ondes de cisaillement au sein de la couche traitée peut ensuite être définie par la relation : $G = \rho \cdot V_s^2$ avec ρ le poids volumique du sol. (7)

L'exemple ci-dessous traite du traitement d'un sol de classe D par caissonnage en DSM sous un bâtiment. Les données d'entrée sont récapitulées au tableau 1.

Tableau 1 : Hypothèses d'un exemple de caissonnage

Profondeur de la base	Sol	γ	pl	Em	α	Eoedo	v stat	Gstat
13	Argiles	19	0.2	2	2/3	3	0.3	0.86
20	Marno calcaire	20	2.5	25	1/2	50	0.3	14.29
30	Marno calcaire	21	5	50	1/2	100	0.3	28.57

- Zone 4 cat II sol D soit $\alpha.S = 0,405$; Bâtiment de largeur 40 m

Profondeur de la base	V_{dyn}	$G_{max} = 7 EM$	G_{dyn} / G_{max}^*	G_{dyn}	V_s	Rapport G_{dyn}/G_{stat}
13	0.43	14	0.12	1.68	30	2.0
20	0.43	175	0.3	52.5	162	3.7
30	0.43	350	0.48	168	283	5.9

* : déterminé à partir du tableau 4.1 de la norme NF EN 1998-5

Dans son état initial le sol présente une $V_{s,30} = 145$ m/s ce qui correspond bien à un sol de classe D. Le traitement envisagé consiste en la mise en place de colonnes de DSM de 60 cm de diamètre espacées de 45 cm ce qui permet de former un voile d'épaisseur équivalente 54 cm. Un matelas de 1 m est mis en place entre les caissons de dimensions 5 x 5 m d'axe en axe et le radier du bâtiment. La résistance caractéristique en compression du mélange sol-coulis du DSM considérée est au minimum égale à 2,5 MPa pour cet exemple.

Pour des argiles, le module de déformation minimale à long terme du DSM est de l'ordre de 200 à 300.fck. Nous proposons de retenir la valeur de 300.fc soit 750 MPa. Le module court terme pour le calcul sismique est pris égal à 2 fois le long terme pour tenir compte des microfissures qui apparaîtront certainement lors du séisme. Compte tenu de la magnitude du séisme, la dégradation du module de cisaillement G considérée est de : $G/G_{max} = 0,9$ se rapprochant des valeurs usuellement utilisées pour les sols très compacts ou le rocher. Les caractéristiques du DSM sont récapitulées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques du matériau DSM.

Fc 28 DSM	E béton long terme	E béton court terme	v Béton de sol	G_{max} Béton de sol	Gd / Gd,max	Gdyn DSM
Mpa	Mpa	Mpa	-	Mpa	-	Mpa
2.5	750	1500	0.25	600	0.9	540

Le module de cisaillement équivalent est obtenu en effectuant 2 modèles de calcul. L'un modélisant le caissonnage et l'autre en le remplaçant par un sol homogénéisé de caractéristique G amélioré permettant d'obtenir en surface la même déplacement horizontal de la fondation.

Après plusieurs itérations, la déformée obtenue avec un sol homogénéisé de module $G = 33,7$ MPa est la même que celle obtenue avec le caissonnage (figure 3). Le G du sol traité a donc été fortement augmenté d'un facteur de 20. ($G_{initial} = 1,68$ MPa) soit un rapport de 4,4 pour les Vs. Le calcul du $V_{s,30}$ du sol amélioré donne un $V_{s,30} = 188$ m/s ce qui correspond à un site de classe C. Le traitement par caissonnage a donc permis de modifier la classe du site en passant d'un sol de type D à C.

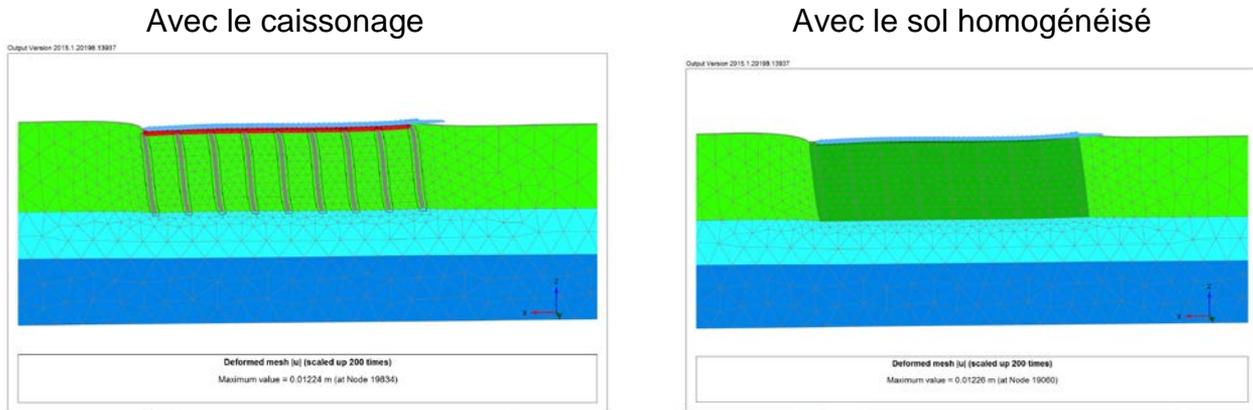


Figure 3 : résultats des déformations des 2 modèles avec caissons et sol homogénéisé.

Par comparaison, l'application des formules (1) et (2) permettent de trouver un module équivalent du sol traité par caissonnage compris entre 60 et 66 MPa ce qui conduit à une vitesse $V_{s,30} > 206$ m/s soit le même ordre de grandeur que Plaxis 3D.

Exemples de projets

1.3 Chantier jet grouting de Chooz

Suite à l'accident de Fukushima, EDF a décidé d'augmenter la sécurité des sites nucléaires vis-à-vis des événements naturels extrêmes. Sur le site de Chooz, le projet consiste à construire 2 bâtiments diesel de secours ultime (DUS). La campagne de reconnaissance a mis en évidence sous une couche de remblai d'un mètre environ, des limons sableux-graveleux très hétérogènes jusqu'à 6-7 m de profondeur et comportant des passages de sable fin potentiellement liquéfiables. Cette formation recouvre des sables et graviers compacts et enfin le substratum schisteux à une profondeur variable de 5,8 à 11,6 m. Les niveaux d'eau évalués dans les terrains peuvent varier entre 3,7 m et 6,7 m de profondeur.

Compte tenu des charges très élevées de l'ouvrage aussi bien statiques que sismiques (moment de renversement et efforts horizontaux notamment) et de la complexité géologique (sols hétérogènes avec lentilles liquéfiables et pente du substratum marqué), le procédé de renforcement de sol par caissonnage en colonnes de jet grouting sécantes a été choisi par EDF comme le procédé le mieux adapté pour répondre à toutes ces problématiques.

Le dimensionnement a été réalisé à l'aide du logiciel Plaxis 3D pour vérifier la portance du sol renforcé et estimer les tassements sous les sollicitations ELS ELU et ELU sismique. La maille du caisson a été de 5,35 x 5,00 m de colonnes de jet grouting de 1 m de diamètre espacée de 80 cm aboutissant à un taux de substitution de 31 % du volume global de sol sous les 2 DUS accolés.



Figure 4: Dégarnissage d'un caisson de jet grouting.

1.4 Projet: Christchurch Town Hal

Dans le cadre d'une réhabilitation d'une église aux Etats-Unis, la reconnaissance de sol a mis en évidence un risque important de liquéfaction entre 3,2 et 8,5 m de profondeur par rapport au TN. L'étude du confortement s'est orientée vers un confortement par caissonnage en jet grouting. Ce procédé a l'avantage d'être réalisé par l'intermédiaire de petites foreuses pouvant accéder facilement à l'intérieur des ouvrages et de travailler sous des hauteurs limitées. Le dimensionnement a permis de définir une taille de caisson de 8,8 m x 8,4 m correspondant à un taux de substitution de 37,2 %.

Tableau 3 : Hypothèses du projet.

M_w	PGA	G_{soil}	H	Profondeur du toit de la couche liquéfiante / TN	Profondeur de la nappe / TN
7,50	0,44 g	0,92 MPa	5,3 m	3,2 m	2 m
γ_r	$A_{soilcrete}$	A	S	A_r	C_G
0,467	27,73 m ²	74,50 m ²	8,43 m	0,37	0,604
Pa	n	Req. SF	$G_{soilcrete}$	G_r	R_{rd}
0,1013 Mpa	0,50	1,10	3125 Mpa	30,00	0,265

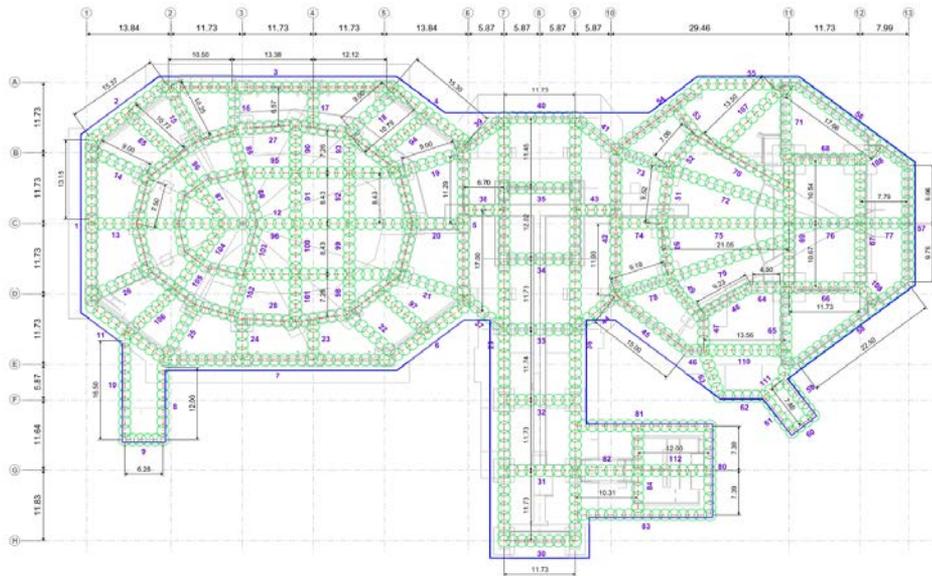


Figure 5 : Plan d'implantation des colonnes de jet grouting.

Conclusion

Le caissonnage en Deep Soil Mixing (DSM) ou en jet grouting est un procédé de renforcement de sol qui présente de nombreux avantages :

- Augmentation de la portance des sols en place ;
- Réduction des tassements ;
- Réduction du potentiel de liquéfaction ;
- Amélioration de la classe de sol sismique permettant ainsi une réduction des efforts appliqués sur la structure.

Ce procédé est particulièrement bien adapté pour des projets lourds en zone sismique situés dans des contextes géotechniques particulièrement complexes. Sa réalisation est possible au sein d'une grande variété de sols y compris lorsque les conditions de réalisation sont difficiles (réhabilitation de bâtiments existants...) grâce à des outils de réalisation variés sachant s'adapter à quasiment toutes les situations.

Références bibliographiques

- Davidovici V., Lambert S., (2013), Fondations et procédés d'amélioration du sol Guide d'application Eurocode 8, Editions Eyrolles,
- M.Gueguin, P de Buhan & G. Hassan (2013), A homogenization approach for evaluating the longitudinal shear stiffness of reinforced soil, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics Volume 37, Issue18, p. 3071-3292.
- N'Guyen T.V., Rayamajhi D., Boulanger R.W., Ashford S.A., Lu J., Elgamal A., and Shao L. (2012). Effect of DSM grids on shear stress distribution in liquefiable soil. Geocongress 2012. p.1948-1957.
- Sondermann W. et al., Ground improvement to reduce the liquefaction potential around pile foundations, Publications of the geotechnical Institute of the Technical University of Berlin, Issue N° 57, Berlin, 2011, Presentation to the 7th Hans Lorentz Symposium on 6th Oct. 2011.

- Topolnicki, M., (2004). "In situ soil mixing, liquefaction mitigation", in Ground Improvement, 2nd edition, M. P. Moseley & K. Kirsch, 2004, p. 383
- Uchida A., Yamada T., Odajima N. and Yamashita K. (2012). Piled raft foundation with grid-form ground improvement subjected to the 2011 earthquake. 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering/4th Asia Conference on Earthquake Engineering. Joint conference proceedings, p.151-156.
- Youd, Idriss, Andrus, Arango, Castro, Christian, Dobry, Finn, Harder, Hynes, Ishihara, Koester, Liao, Marcuson, Martin, Mitchell, Moriwaki, Power, Robertson, Seed, and Stokoe (2001) : "Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, 127(10), 2001 : 817-833.