

# Amélioration des sables marin par vibroflottation et stabilité du caisson

Houssam Khelalfa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Département de génie civil de l'Université Mohammed Seddik Benyahia de Jijel, Algérie,  
Corresponding author. Tel.: +213770591157; E-mail: khelalfahoussam@gmail.com.

**RÉSUMÉ.** Le traitement du sol par vibroflottation est une technique récente permettant l'amélioration d'un sol présentant de médiocres propriétés géo-mécaniques. En outre, ce traitement permet de minimiser le risque de liquéfaction et l'instabilité de caisson. Ce travail permet d'une part d'établir une simulation numérique bi-dimensionnelle d'un essai réel de vibroflottation, basé sur un modèle en éléments finis. d'autre part, le travail consiste à faire une étude numérique bidimensionnelle de la stabilité de caisson réalisé sur le sol traité, afin de vérifier son influence sur la stabilité de l'ouvrage. Les résultats de calcul seront comparés avec les mesures in-situ pour valider le modèle numérique.

**ABSTRACT.** Soil treatment by vibroflotation is a recent technique for improving soil with poor geo-mechanical properties. In addition, this treatment minimizes the risk of liquefaction and the instability of the caisson. This work allows us to establish a two-dimensional numerical simulation of a real vibroflotation test, based on our model and our hypothesis of modeling this mechanism in finite elements. On the other hand, the work consists in making a two-dimensional numerical study of the stability of the caisson carried out on the treated soil, in order to verify its influence on the stability of the structure. The calculation results will be compared with in-situ measurements to validate the numerical model.

**MOTS-CLÉS :** Ouvrage maritime, Vibroflottation, Liquéfaction, Tassement, Modélisation numérique

**KEY WORDS:** Marine structure, Vibroflotation, liquefaction, Settlement, numerical modelling

## 1.Introduction

Le sol est généralement un matériau hétérogène avec des caractéristiques très variables. Les principaux problèmes liés aux sols de manière générale se manifestent par une capacité portante faible, des déformations (tassements absolus ou différentiels) importantes sous charges statiques, ou dynamiques (séisme, liquéfaction) particulièrement pour les sols sableux lâches et saturés [1].

La vibroflottation constitue une méthode d'amélioration de sol parmi les plus compétitives de par leur rapidité d'exécution et leur prix compétitif par rapport aux autres méthodes existantes. Le traitement par cette méthode permet d'atteindre généralement les buts suivants : l'augmentation de la capacité portante ; la réduction du tassement ; l'accélération de la consolidation ; l'élimination du risque de liquéfaction; aucun effet négatif n'a été signalé sur l'environnement [2,3,4].

C'est grâce à ces avantages pratiques que la vibroflottation est devenue d'usage intense à l'échelle internationale, outre l'aspect économique [3], (coût, délais d'exécution) par rapport à d'autres solutions telles que les fondations profondes ou autres [5,6].

## 2.Technique de vibroflottation:

La vibroflottation est une technique pour la densification in situ des couches épaisses de dépôts granulaires lâches de sol. Elle consiste à générer, à l'aide d'un vibreur de profondeur (vibroflot), des vibrations horizontales dans les sols grenus afin de les cisailer et de provoquer une liquéfaction localisée et un tassement immédiat [7].

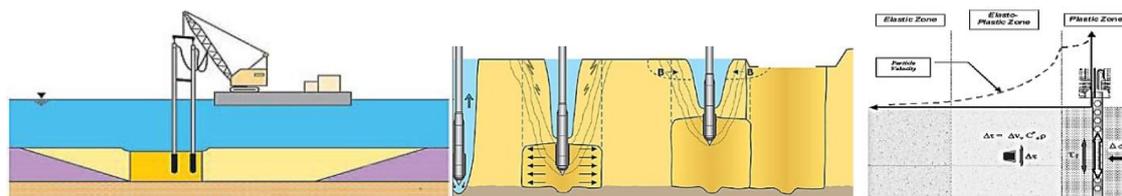
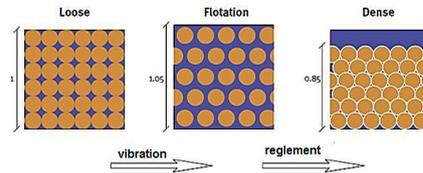


Fig. 1 – les étapes de l'opération de la vibroflottation.

La méthode de Vibroflottation emploie des vagues de compression pour rendre le sol compact, en réarrangeant le modèle de distribution de grain tout en appliquant les vibrations cycliques. En conséquence, le tassement du sol et la réduction de volume de pore sont obtenus [8].

Pendant le processus de vibroflottation, les vibrations présentées dans le sol, permettent aux particules de sol de se réarranger sous les forces de la gravité dans l'état le plus dense possible. Ceci augmente la densité relative du corps du sol étant traité et les résultats dans une réduction globale de volume [9].



**Fig. 2 – Le mécanisme de liquéfaction**

On peut séparer le processus global de liquéfaction en trois grandes phases:

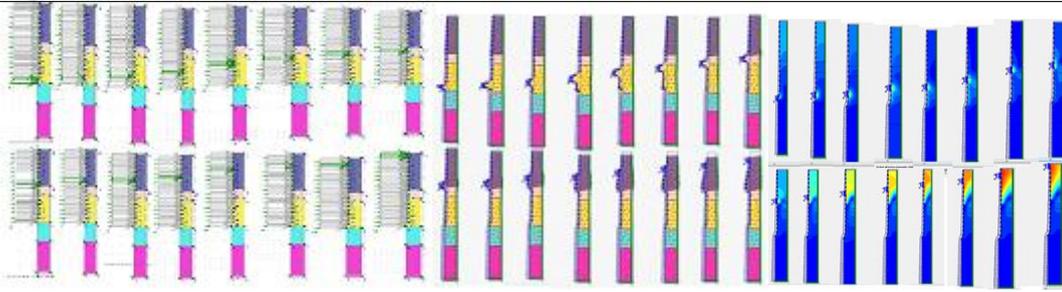
- Arrangement initial peu compacté: La pression interstitielle ou pression de pore à l'intérieur du sol est la pression hydrostatique. Le poids des grains est porté par le squelette granulaire.
- Liquéfaction-consolidation (déstabilisation): sous l'effet des vibrations, les grains bougent et sont déstabilisés. Durant une période transitoire, les grains sont portés par le fluide ce qui provoque une augmentation de la pression de pore. Puis l'excès de pression interstitielle diminue progressivement.
- Arrangement final : les grains sont à nouveau en contact mais dans un réseau plus compact. La pression de pore est hydrostatique et le poids des grains est repris par le squelette granulaire.

### **3.Simulation numérique de la vibroflottation:**

#### **3.1 Hypothèses de calcul et résultats:**

La modélisation numérique du mécanisme de la vibroflottation de sable a été établie par le code de calcul Plaxis 2D, qui a permis d'élaborer un modèle numérique bi-dimensionnelle en axisymétrie en prenant une seule colonne traitée par vibroflottation. Les vibrations de la vibroflot ont été simulées par des charges dynamiques horizontales qui permettent de créer ainsi des vagues horizontales sur le sol. Et vu la difficulté d'avoir établi une modélisation réelle qui prend fidèlement en considération toute la procédure d'exécution de la méthode, certaines hypothèses ont été utilisées dans notre modélisation qui sont les suivantes [10] :

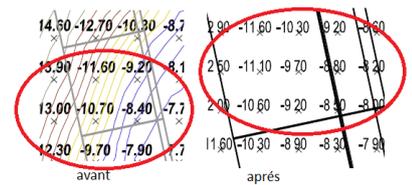
- Le modèle est axisymétrique.
- La loi de comportement utilisée pour le sable, le gravier et la marne est celle de Mohr-Coulomb.
- La contrainte due à la mise en place (descendre de la tige) de la vibroflot est considérée négligeable.
- Le refoulement du sable au niveau haut est négligeable.
- Calcul hydrostatique des pressions interstitielles.
- Les déformations affectées par la descender de la tige de vibroflot sont considérées négligeables.
- La charge appliquée par la vibroflot est dynamique.



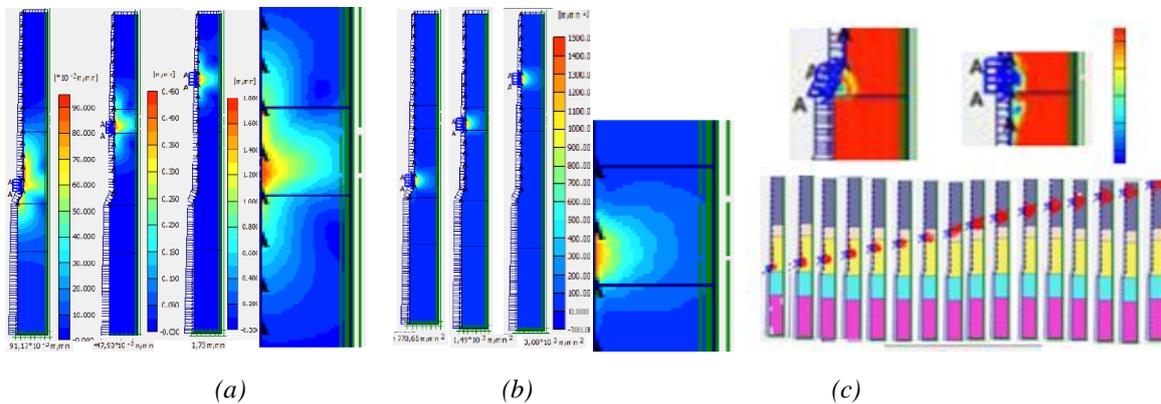
**Fig.3– Phasage de calcul et déformation du modèle numérique.**

On trouve que le tassement final est de 52.29 cm, égale presque 3.27% de la profondeur traité (16m), avec un départ par indice de vide est égale à 0.5. Ces résultats sont à partir d'une modélisation avec certaines hypothèses de calcul qu'éliminent quelques facteurs. Une modélisation qui prend en compte tous les facteurs peut donner un tassement plus grand.

Référence aux la comparaison avec le levé bathymétrique réel avant le traitement du sol (même point modélisé) de la JETEE(QAUI) EST du port de DjenDjen effectué le 18/01/2012, et après le traitement effectué le 14/08/2012. On remarque une moyenne du tassement environ 87.5 [10]. On remarque une différence de 35.21cm du tassement, Ce qui donne une grande crédibilité de notre hypothèse et notre modèle.



On remarque que les points plastiques augmentent proportionnellement avec la diminution de la profondeur. En conséquence; la zone plastique dépend essentiellement à la rigidité du sol. Ainsi, que le degré de saturation aux les bornes du vibroflot est inférieure à 100% (diminution de 50% à 65% d'environ). Ce qui indique la présence d'une dissipation temporaire de la pression interstitielle.



**Fig.4– a) Les vitesses , (b) : L'accélération des ondes de la sollicitation dynamique.,c: Points plastiques /degré de saturation**

On remarque une augmentation proportionnellement de la vitesse et l'accélération avec la diminution de la profondeur, en revanche, nous notons que la prévalence est décroissante. Ainsi, que les vagues propageant subissent l'atténuation par rapport à la distance du rayon d'action du vibreur ; Ce qui indique la présence d'un comportement amorti. En conséquence; la propagation des ondes de vibration dépend à la rigidité du sol et que le comportement mécanique des sables est fortement influencé par leur état interne en terme de la densité du matériau.

## 4. Modélisation du caisson par le code PLAXIS 2D V8.2 (Méthode des éléments finis) avant et après traitement :

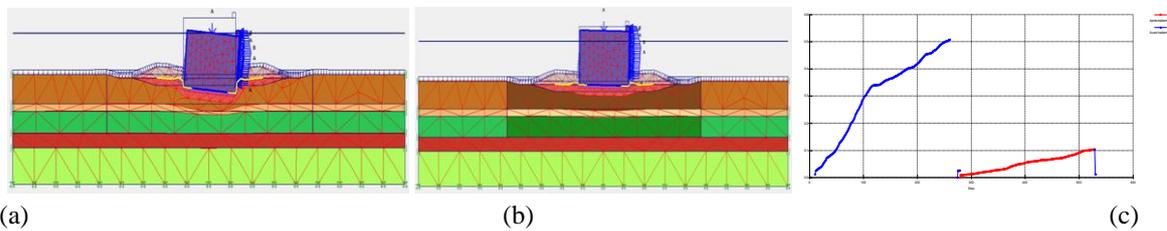


Fig.5– le tassement du caisson sur sol marin (a) avant et (b) après traitement. (c) avant (bleu) et après (rouge)

Le tassement général du sol en place avant traitement est de 53,538cm ; le tassement général du sol en place après traitement est de 14,52cm [10].

Cette différence de déplacement est due à l'effet du traitement du sol (vibroflottation), ce qui fait une augmentation de la capacité portante et une amélioration de la compacité (densité) sur le sol qui devient plus dense, cette dernière a un grand effet sur le tassement et la déformation du sol.

Une vérification mensuel de tassement du caisson au-dessus notre réel sol traité ; effectué le 12/02/2014 par l'entreprise DAEWOO E & C ; ont trouvé 0.128m du tassement. Ce qui donne une grande crédibilité de notre modélisation bi-dimensionnelle [10].

## 5. Conclusion :

Dans cet article, une hypothèse de calcul avec un modèle sont créés pour la simulation et modélisation en vrai grandeur de la vibroflottation sur le sol d'interaction. La théorie nous donne une prévision des déformations, sollicitations et des contraintes au cours du traitement. On observe également que les résultats obtenus sont considérés acceptables et entre dans les fourchettes du levé bathymétrique disponible réalisé avant et après le traitement du sol, ce qui justifie et donne une grande crédibilité à notre hypothèse et notre modèle, et les résultats du tassement (figure-5) sont en excellent accord avec les résultats réel, ce qui renforcé notre étude est conclu que ; la vibroflottation donne des résultats très satisfaisants en termes d'amélioration du sol.

## REFERENCES

- [1]- F.G. Bell, V. Detry, Méthode de traitement des sols instables, Eyrolles, Paris, 1978.
- [2]- J. Lehuérou-Kérisel, A. Caquot, J. Kersiel, Traité de la mécanique des sols (4eme édition) Paris 1966
- [3]- Amélioration des sols (Vibroflottation) Ménard, Doc. Keller, 1974
- [4]- K. Tarzaghi, R.B. Peck, G. Mesri, Soil mechanics in engineering practice, John Wiley & Sons, 3rd Edition, 1996.
- [5]- M. Jefferies, K. Been, Soil liquefaction, a critical state approach. CRC Press Book, 2015.
- [6]- P. Aussillous, D. Collart, O. Pouliquen, Liquéfaction des sols sous vagues. In : Proceeding of 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007.
- [7]- J. Mecsí, A. Gökalp, R. Düzceer, Compactage des remblais hydrauliques par la technique de vibroflotation , In : Proceeding of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Université de Pécs, Hungary, 2005.
- [8]- A Gökalp, R Düzceer vibratory deep compaction of hydraulic fills. In: Proceeding of The XIIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE, Prague, Czech Republic, 2003.
- [9]- R.D. Andrus, R.M. Chung, Ground Improvement Techniques for Liquefaction Remediation Near Existing Lifelines. Report, NISTIR 5714, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1995.
- [10]- H. Khelalfa, Soil Treatment by Vibroflottation, – Application to protection structures of DjenDjen port, Jijel, Algeria, In: JOURNAL OF MATERIALS AND ENGINEERING STRUCTURES 3 (2016) 149–160.