

Projet ViSAv – Vibreur de Sol Avancé – Sujet de thèse

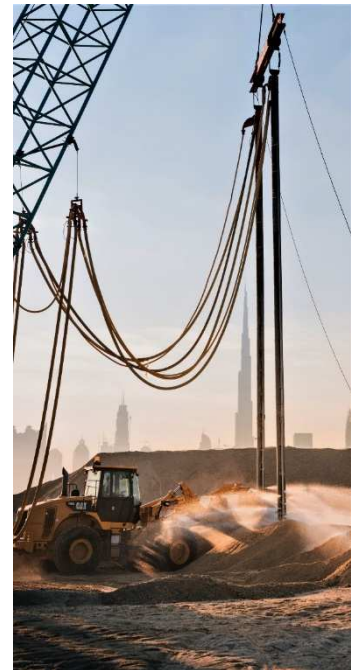
Directeurs de thèse : Régis Dufour – Lionel Manin/ LaMCoS – INSA Lyon
Co-directeurs de thèse : Stéphane Grange- Laurent Briançon/ Geomas – INSA Lyon
Co-encadrant : Benoit Quandalle / Menard

1 Contexte

Menard est une entreprise du groupe VINCI spécialisée dans les techniques de consolidation et de renforcement de sols. Entreprise française avec un fort ancrage à l'international grâce à des filiales présentes sur tous les continents, Menard met en œuvre des traitements qui permettent l'économie des fondations profondes traditionnellement utilisées pour porter les ouvrages de surface.

Parmi ces techniques, le vibro-compactage utilise des aiguilles vibrantes qui sont foncées dans le sol pour le compacter à grande profondeur. Souvent associées à un apport d'eau, les vibrations conduisent à la liquéfaction localisée du sol dont les grains peuvent ainsi se réarranger en un état plus dense.

Menard utilise des aiguilles vibrantes propriétaires, développées par sa filiale allemande Vibro Services et dont la conception remonte à plus de 25 ans. Ces aiguilles, systèmes mécaniques complexes en interaction avec le sol, sont souvent utilisées dans des conditions extrêmes sur les chantiers, liées autant à leur durée d'utilisation (travail continu en 2 postes) qu'à l'environnement (eau, atmosphère saline, matériaux abrasifs, température, poussière, etc.). Les retours d'expérience récents des chantiers ont aussi mis en évidence des problématiques technologiques et des besoins nouveaux qui nécessitent de mener des actions de recherche.



2 Problématiques technologiques

2.1 Réduction de la consommation énergétique

La consommation électrique des aiguilles vibrantes représente une part importante du bilan carbone des chantiers de vibro-compactage, qu'il est essentiel de réduire. Les pistes de recherche incluent :

- Moteur électrique plus efficace ;
- Variation de la fréquence de vibration pour rechercher la résonance du sol et faciliter la pénétration ou le compactage ;
- Ajustement de la durée, de l'amplitude et/ou de la fréquence des vibrations au sol et à la phase de travail (descente-pénétration / montée-compactage).

2.2 Optimisation mécanique/électrique

La conception initiale de même que l'utilisation des aiguilles vibrantes ont été et sont très expérimentales. Pour rester compétitif, il est donc essentiel pour Menard de mieux comprendre et maîtriser le fonctionnement des vibreurs afin d'en permettre une conception raisonnée tout en y intégrant les dernières avancées technologiques. Les besoins sont multiples :

- Réduire la puissance consommée pour une amplitude et une fréquence données :
 - Réduire les pertes énergétiques liées à la conception du moteur,
 - Réduire les pertes mécaniques liées à la conception du vibreur.
- Réduire les pannes qui peuvent être liées :
 - Au joint anti-vibratoire entre l'aiguille vibrante et son support,
 - Au moteur électrique,
 - Aux roulements fortement sollicités.

2.3 Instrumentation et contrôle du procédé

Si les vibreurs sont instrumentés depuis longtemps, il s'agit d'aller plus loin grâce aux dernières avancées de l'IoT pour conduire à une utilisation optimale des vibreurs compte tenu de la réaction du sol. Le développement de systèmes experts prédictifs et temps réel doit permettre à terme :

- L'évaluation a priori et en temps réel de l'efficacité mécanique du vibreur, soit l'optimisation des paramètres (amplitude, fréquence, poids sur outil, énergie consommée) par rapport à l'effet recherché en fonction de la réponse du sol : vitesse de pénétration maximale / temps de compactage minimal.
- L'évaluation en temps réel de l'efficacité du traitement (l'objectif de compactation est-il atteint ?) pour fournir à l'opérateur des aides au pilotage
- Le signalement de dysfonctionnements qui nécessitent une intervention pour éviter des casses.

2.4 Conclusion – axe de recherche

Outre ces problématiques technologiques, les plans de développement de Menard prévoient l'automatisation rapide de ses divers équipements spécialisés, et à terme des machines autonomes pour l'amélioration de sol. Pour le vibro-compactage, une première étape consiste donc d'abord à moderniser les aiguilles vibrantes. Menard a donc programmé une étude approfondie de ses vibreurs actuels. L'objectif principal des premiers travaux de recherche est l'élaboration d'un modèle électromécanique dynamique complexe d'un vibreur en interaction avec un sol de type granulaire. L'étude comprendra aussi un volet expérimental en vraie grandeur pour calibrer le modèle, ainsi qu'une étude paramétrique pour mieux appréhender le fonctionnement du système en vue d'optimiser ensuite sa conception.

3 Approche expérimentale

La taille du vibreur et le volume de sol mis en jeu lors du compactage rendent difficile la validation expérimentale en laboratoire. Des essais en vraie grandeur seront donc réalisés in situ pour vérifier expérimentalement l'efficacité des développements apportés sur l'appareil et calibrer les modèles numériques. Le sol du site sera caractérisé par des essais in situ (pénétrömètre statique) et en laboratoire avant et après le compactage afin de vérifier l'augmentation de la densité du sol. Des capteurs seront installés dans le sol et sur le vibreur pour apporter des données nécessaires à la calibration des modèles numériques. Il sera d'ailleurs intéressant de mesurer le rayon du sol amélioré et de quantifier cette amélioration.

Une première expérimentation sera programmée en début de thèse pour analyser les mécanismes mis en jeu dans le vibro-compactage et proposer des pistes d'amélioration de l'outil. Une seconde expérimentation sera programmée avec le nouvel outil sur le même site et dans des conditions similaires pour valider le modèle numérique, voire pour montrer l'efficacité du nouveau matériel développé.

4 Approche numérique

L'interaction sol granulaire/vibreur constitue un verrou numérique complexe qu'il convient d'étudier. En effet, si le vibreur a une action évidente sur le sol (réarrangement des grains) l'action du sol sur le vibreur conditionne son bon fonctionnement et son efficacité. Une approche numérique qui intégrerait la globalité du système d'étude (sol et vibreur) s'avèrerait extrêmement difficile compte tenu du niveau de complexité attendu pour la description du vibreur (possible par une modélisation éléments finis) et de celle du sol (matériau granulaire dont le comportement peut être avantageusement restitué par une méthode discrète). L'idée de l'approche numérique envisagée est d'établir le comportement de macroéléments (éléments caractérisant le comportement de l'interface sol/pieu qui seront utilisés comme conditions aux limites dans un modèle éléments finis. Le comportement de ces macroéléments (relation force/déplacement à l'interface sol/pieu) sera établi grâce à une modélisation par éléments discrets. Pour cela, des séries de simulations numériques, pour lesquelles seront imposées des conditions cinématiques telles que celles imposées par le vibreur, permettront de donner la réponse numérique en force du sol granulaire. Le modèle discret, de par sa nature, permet de restituer le comportement du sol en prenant en compte les phénomènes de compactation ou de dilatance caractéristiques des sols granulaires. Une fois établi le

comportement des macroéléments, le modèle continu pourra être utilisé systématiquement pour optimiser les caractéristiques du vibreur, et ce tout en conservant des temps de calcul raisonnables.

Le vibreur est un ensemble élancé et vertical. Sa partie haute est un tube d'allonge suspendu à une grue, et dont la longueur vise la profondeur à atteindre. Sa partie basse, l'aiguille vibrante assure des vibrations latérales dont la fréquence et l'amplitude sont ajustées par la vitesse de rotation d'un rotor équipé d'une moteur-électrique entraînant plus bas un balourd réparti. Trois paliers à corps roulants centrent ce rotor dans l'aiguille, le stator électrique étant emmanché dans l'aiguille. Une articulation avec joints toriques en élastomère, relie l'aiguille au tube allonge et lui autorise un mouvement conique (pendulaire) dont l'amplitude est maximale au niveau de l'extrémité inférieure, où se situent les lames inférieures et latérales. Soumises au poids du vibreur et aux forces tournantes du balourd, les lames assurent les pénétrations verticale et latérale de l'aiguille dans le sol. Elles bloquent aussi la rotation de l'aiguille autour de son axe vertical.

Le vibreur est à modéliser avec des éléments finis (EF) de poutre de Timoshenko (et avec raideur géométrique) à deux nœuds avec six degrés de liberté par nœud : une branche d'EF pour le tube allonge, connectée par un EF d'accouplement à deux branches d'EF concentriques, l'une pour le rotor, l'autre pour l'aiguille (stator). Les paliers à roulements sont modélisés par des EF à deux nœuds, l'un sur le rotor et l'autre sur l'aiguille. Les nœuds des EF du tube allonge et de l'aiguille sont à charger des efforts de restitution du sol issus des macroéléments du sol. La vitesse de rotation peut être calculée à partir des équations électromécaniques du moteur électrique et les forces radiales électromagnétiques du moteur électrique sont aussi à prendre en compte.

Ainsi cette partie du modèle à développer est non linéaire en déflexion car il comporte l'interaction Vibreur – sol, et électromécanique. Sa résolution temporelle fournit les efforts dans les EF, y compris les roulements, des orbites, les contraintes, ...

5 Etude paramétrique

Une fois le modèle numérique élaboré puis validé sur le terrain, il pourra être utilisé pour mener une étude paramétrique afin de déterminer, d'une part les paramètres mécaniques clés régissant l'effet d'amélioration du sol, et d'autre part l'influence de ses caractéristiques sur son comportement dans le sol afin de l'optimiser.

6 Encadrement / Contrat

La thèse sera encadrée par des enseignants-chercheurs des laboratoires LaMCoS et GEOMAS de l'INSA Lyon et 3SR de l'Université Grenoble Alpes. Le (la) candidat(e) sera aussi rattaché(e) à l'équipe Recherche, Développement et Innovation, de la société Ménard dans laquelle il (elle) sera salarié(e) dans le cadre d'un CDD Recherche de 3 ans avec le statut d'ingénieur-chercheur débutant. Il (elle) sera encadré (e) par Benoit Quandalle au sein de l'entreprise. Le CDD Recherche sera précédé dans la mesure du possible d'un CDD de 6 mois au maximum comme ingénieur travaux pour que le (la) candidat(e) se familiarise aux techniques et méthodes de Menard sur chantier.

Pour sa thèse, le (la) candidat(e) sera basé(e) à l'INSA de Lyon et sera présent(e) dans l'entreprise Menard pour au moins 1/3 du temps (région lyonnaise, et déplacement à prévoir sur Orsay au siège de Menard ou sur chantier).

7 Profil du candidat

- Profil Grande Ecole, option mécanique / systèmes avancés
- Excellentes capacités d'analyse et de synthèse, une première expérience en modélisation numérique serait un plus
- Sens pratique, réel goût pour le terrain et les expérimentations
- Anglais a minima, Allemand un réel plus.
- Permis B obligatoire