



## Vibrations profondes

L'amélioration de sol commence ici

Solutions dans les domaines des fondations spéciales  
pour le secteur de la construction

# Les techniques de vibrations profondes



## Le sol

Les caractéristiques de sols sont en général consignées dans un rapport d'études de sol. Dans le cas où les caractéristiques géo-mécaniques des couches de sol en place ne répondent pas aux exigences du projet en terme de capacité portante ou de tassements, le recours aux techniques de vibrations profondes offre une solution économique d'amélioration de sol. Ils permettent de revenir à un système de fondations superficielles, applicable à la plupart des terrains compressibles.

## Le vibreur

Le vibreur de conception Keller mesure entre 3 et 4 mètres de long et pèse environ 2 tonnes. Le moteur électrique interne du vibreur entraîne un excentrique qui génère les oscillations horizontales de l'outil. Le vibreur est assemblé à des tubes-rallonges pour permettre d'atteindre la profondeur de traitement désirée. L'ensemble est monté en système pendulaire sur une grue ou sur une foreuse Keller de type TR.

## Les différentes techniques

Il existe 2 techniques : le vibrocompactage et la colonne ballastée. Le choix de la technique se fait en fonction de la nature des sols et de la capacité portante attendue. La mise au point du traitement est réalisée par Keller, en étroite collaboration avec les ingénieurs géotechniciens et structures de l'équipe de maîtrise d'œuvre.

La technique du vibrocompactage permet un réarrangement optimal des matériaux granulaires afin d'augmenter la densité du sol en place.

Dans les sols cohésifs, ou les sols granulaires comportant une teneur en fines élevée, la technique de colonnes ballastées est utilisée. Elle consiste à réaliser des colonnes de renforcement à l'aide de granulats roulés ou concassés.

## Réalisation

Quelle que soit la technique employée, le procédé consiste à faire pénétrer le vibreur au sein des terrains compressibles. Par la suite et en fonction de la technique mise en œuvre, l'outil vibrant est remonté par passes successives pour compacter le sol de bas en haut (vibrocompactage), ou pour refouler le gravier destiné à réaliser une colonne (colonnes ballastées).



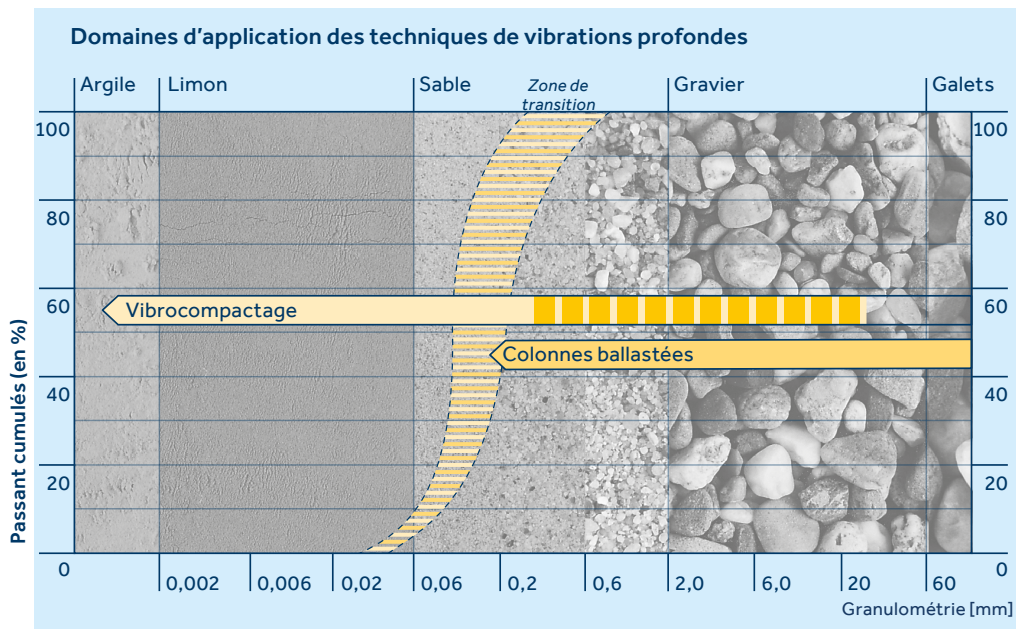
# Vue d'ensemble

Les techniques de vibrations profondes offrent des solutions écologiques, simples à mettre en œuvre et très efficaces dans l'amélioration des sols. On les utilise pour tout type de construction sur des sols à faible portance, sous les dallages et les remblais. Keller a inventé un vibreur homologué en 1934, utilisé à l'origine pour compacter uniquement des sols granulaires (sable ou gravier). Depuis, Keller utilise un vaste choix de modèles de vibreurs et de techniques pour optimiser l'amélioration de sols, qu'ils soient de type granulaire ou cohésif.

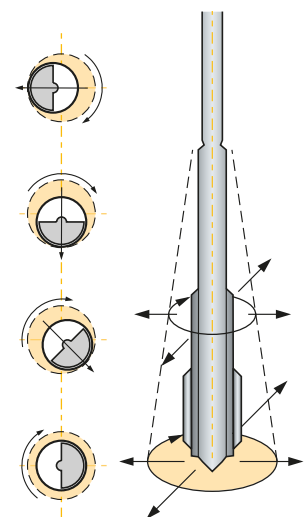
## Avantages du procédé

Les techniques de vibrations profondes sont des méthodes polyvalentes d'amélioration du sol adaptées à toutes sortes de sols et de contraintes. Leur réalisation relativement rapide, même dans le cas d'un grand volume de sol à traiter, permet d'enchaîner avec les travaux de gros-œuvre. Le Client pourra par la suite recourir à des semelles superficielles standards (absence de points durs), et ainsi, réaliser des économies importantes pour son projet.

Autre avantage : Il s'agit d'un procédé respectueux de l'environnement car seuls des matériaux naturels in situ sont utilisés. De plus, la quantité de matériau utilisé durant l'opération est relativement réduite (entre 2 et 10 % du volume du sol traité).



## Mode opératoire



# Vibrocompactage des sols granulaires

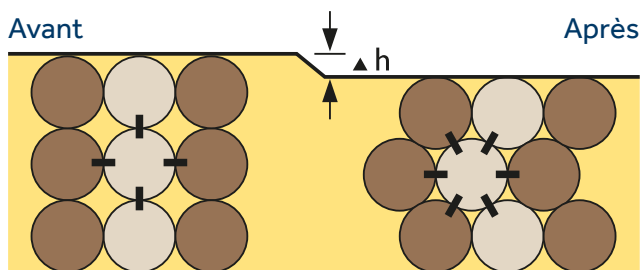
## Matériel et réalisation

Le compactage des matériaux grenus est optimisé lorsque les vibreurs oscillent à une faible fréquence ; on obtient ainsi une densité optimale des particules du sol. Dans ce cas de figure, le vibreur est fixé à une grue sur chenilles. La pénétration de l'outil dans le sol (et le compactage lui-même, dans une certaine mesure) est facilitée par le lançage à eau provenant des orifices d'injection d'eau situés en pointe de l'outil. Le vibrocompactage est réalisé par passes successives de bas en haut. Le résultat du compactage dépend de l'efficacité du vibreur, de l'état du sol et de la maille retenue.

## Aspect géotechniques

Les vibrations émises par l'outil permettent un réarrangement des matériaux granulaires afin d'occuper le plus petit volume possible.

La réduction du sol compacté peut atteindre 15% de son volume de départ, selon l'état initial du sol et l'intensité du compactage.

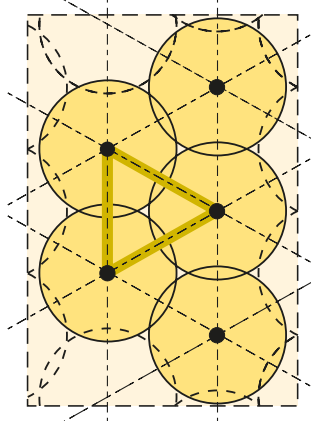


## Conception du traitement

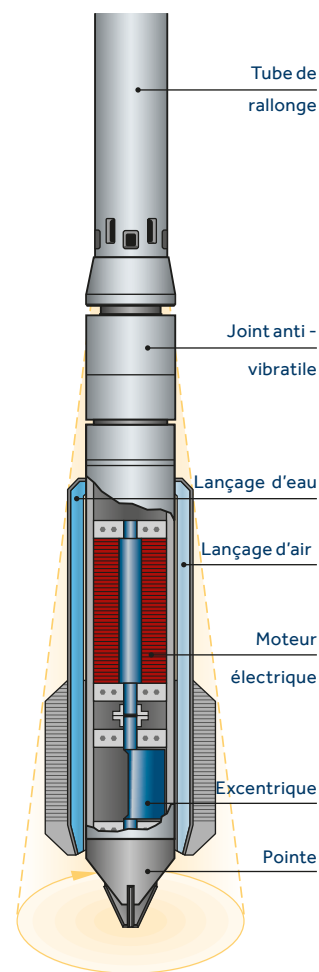
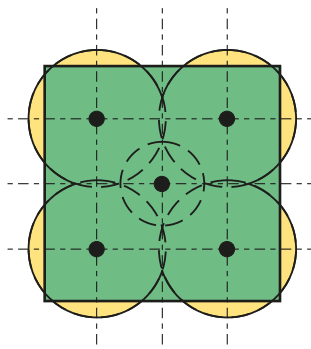
Le compactage de sol à partir d'un point de compactage dépend de plusieurs paramètres. Forte de son expérience dans le domaine, Keller a les compétences pour proposer le type de renforcement le plus approprié possible.

En règle générale, une planche d'essais réalisée sur le site permet de déterminer les paramètres de travail et le maillage pour un réarrangement optimal des matériaux. Une fois le sol compacté, de lourdes charges allant jusqu'à 1 MPa aux E.L.S. peuvent être supportées en toute sécurité. Les points de vibrocompactage peuvent être agencés pour traiter n'importe quel volume de sol. Les résultats d'amélioration obtenus sont facilement vérifiables par des sondages et essais in situ.

Compactage sous assemblage de semelles



Compactage sous semelles localisés

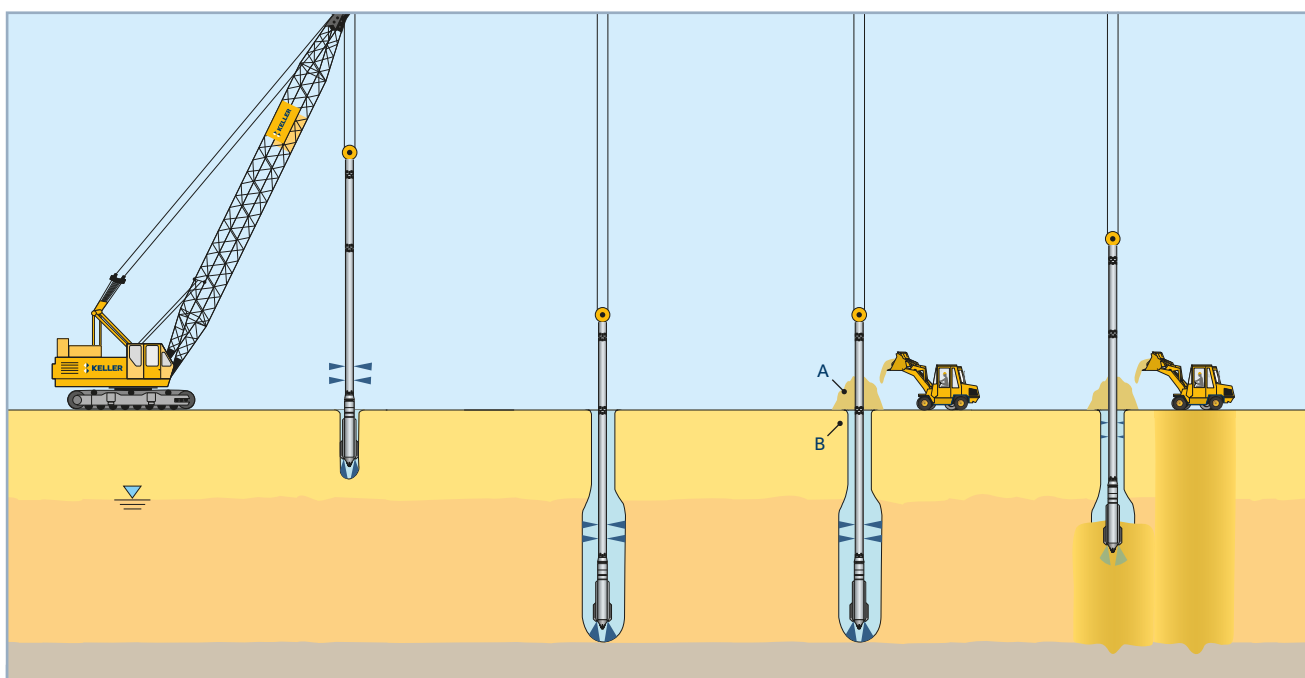




# Précisions techniques

La technique de vibrocompactage est mise en œuvre pour le traitement des sols granulaires contenant peu de fines ; il s'agit de réarranger les particules du sol en un état plus dense.

## Déroulement des opérations



### 1. Fonçage

Sous l'effet de l'eau de lancement en pression, le vibreur est descendu jusqu'à la base de terrains compressibles. Les remontés et descentes de l'outil, les vibrations et la circulation d'eau créent un vide annulaire autour du vibreur qui facilite sa descente.

### 2. Compactage

Il s'effectue par passes successives en remontant l'outil. Un point de compactage peut traiter un cylindre de sol d'un diamètre allant jusqu'à cinq mètres. L'augmentation de la densité du sol est mesurée par la consommation électrique du vibreur.

### 3. Comblement

Le cône ouvert qui se forme autour du vibreur est comblé par du sable ou par un matériau granulaire propre. Ce matériau est apporté (A) ou prélevé sur le site (B). Son volume peut atteindre jusqu'à 15 % du volume de sol traité.

### 4. Finition

Après traitement, la plate-forme est nivelée, puis compactée au rouleau vibrant lourd.

## Avantages du vibrocompactage

- Diminue les tassements des fondations
- Augmente la portance du sol et donc réduit les dimensions des semelles
- Augmente les raideurs du sol
- Augmente l'angle de frottement du sol
- Diminue la perméabilité du sol
- Supprime le risque de liquéfaction
- Stabilise les talus
- Permet des constructions sur remblai
- Permet la construction sur semelles superficielles
- Empêche le lateral spreading en cas de séisme.

# Colonnes ballastées dans les sols granulaires avec un pourcentage élevé de fines et dans les sols cohésifs

## Matériel et réalisation

Pour la réalisation des colonnes ballastées, la technique de vibreur à sas est la plus couramment utilisée : de l'air comprimé permet aux matériaux granulaires d'être acheminés jusqu'à la pointe du vibreur. Pour optimiser l'efficacité de ce procédé et de l'équipement utilisé, Keller a mis au point la foreuse vibrocat qui permet le guidage et l'activation du vibreur dans le sol. Ce système permet également d'augmenter la pression de pénétration dans le sol et lors du compactage. La réalisation des colonnes ballastées se déroule en deux temps : le vibreur est d'abord légèrement remonté, permettant aux matériaux granulaires de combler le forage, puis redescendu dans la colonne ainsi constituée de manière à compacter et comprimer les matériaux introduits dans le sol alentour. Ce principe de réalisation des colonnes, construites de bas vers le haut, permet d'obtenir un massif de sol composite confiné latéralement.

## Aspects géotechniques

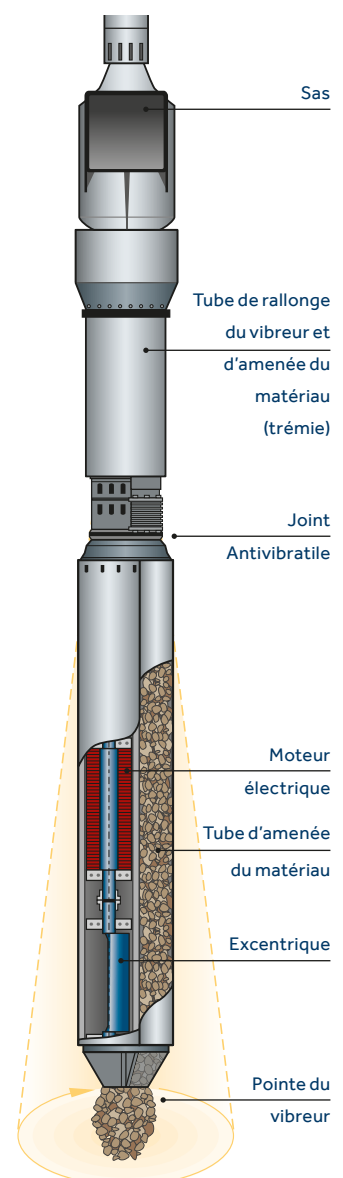
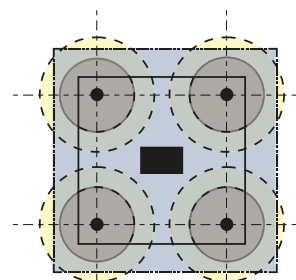
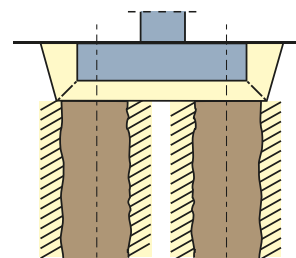
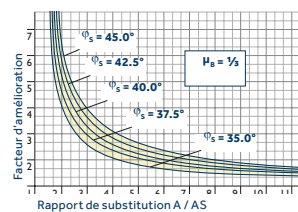
La plupart des sols fins ou granulaires peuvent se compacter sous l'effet des vibrations et/ou du refoulement (ceci dépend principalement de la teneur en fines). Cette augmentation de compacité peut être mesurée de la même manière que dans le cas du vibrocompactage. Néanmoins dans la majorité des situations, aucun compactage du sol n'est considéré. L'amélioration considérée est due avant tout à la rigidité et à la résistance au cisaillement de la colonne tout comme de la zone annulaire de sol confiné autour de la colonne.

## La conception des fondations

Si l'on peut mesurer facilement l'amélioration de sol entre les colonnes par des sondages, le contrôle de la colonne ballastée peut se faire plutôt à partir d'un essai de chargement.

Keller a mis au point une méthode de dimensionnement reconnue, qui repose sur plusieurs paramètres dont la géométrie des colonnes et l'angle de frottement du matériau qui les constitue. Pour la conception des fondations, on considère le sol amélioré comme un sol homogénéisé. La capacité portante du sol renforcé se situe généralement entre 150 et 400 kPa à l'ELS.

Abaque de dimensionnement des colonnes ballastées

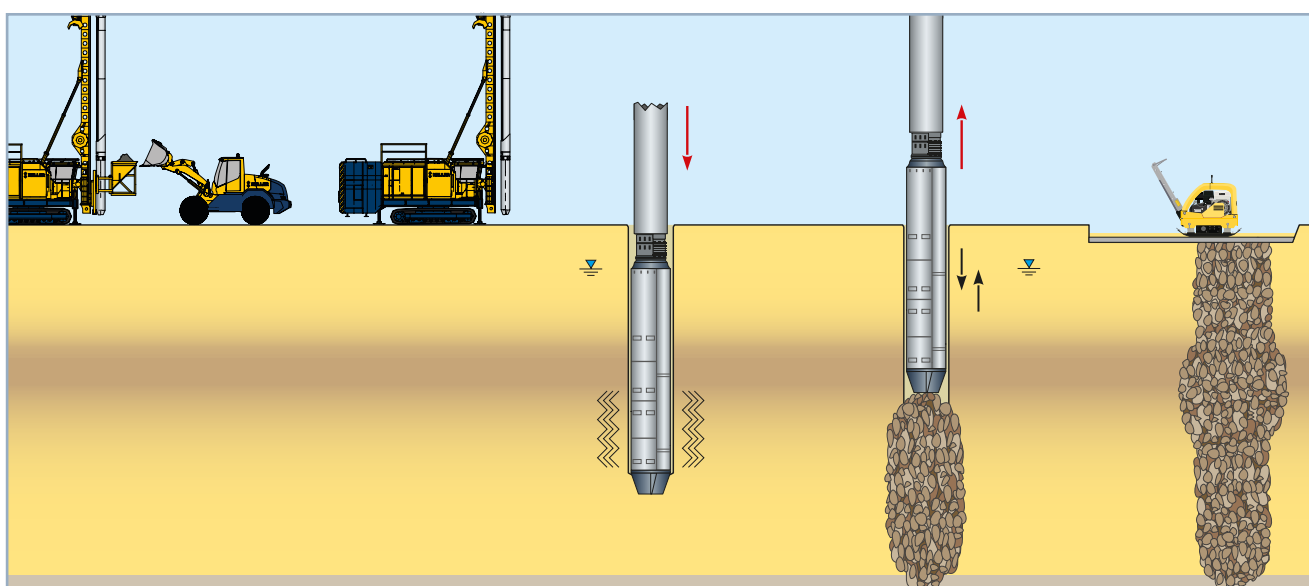




# Précisions techniques

La technique de colonnes ballastées consiste à réaliser des colonnes porteuses composées de granulats roulés ou concassés refoulés dans des sols cohésifs et dans des sols granulaires à fort pourcentages de fines.

## Principe de réalisation



### 1. Préparation

Mise en station du porteur Vibrocat stabilisé à l'aide de ses 4 vérins hydrauliques et positionnement du vibreur au-dessus du point à compacter. Déversement du granulat dans la trémie.

### 2. Remplissage du vibreur

La trémie coulisse le long du mat et déverse le granulat dans le sas à air comprimé. Dès que le sas est fermé, l'air comprimé propulse le matériau vers la pointe du vibreur.

### 3. Fonçage

A l'aide de l'air comprimé et de l'activation hydraulique de la foreuse Vibrocat, le vibreur est vibrofoncé jusqu'à la profondeur requise.

### 4. Compactage

Le vibreur est légèrement remonté, entraînant le comblement du forage par le gravier qui s'écoule par la pointe. L'activation du vibreur vers le bas permet de refouler latéralement le granulat tout en le compactant.

### 5. Finition

La colonne ballastée est ainsi réalisée par passes successives. Après nivellement, le sol est à nouveau compacté en surface avec un rouleau vibrant. Selon le cas, un béton de propreté peut également être coulé.

## Avantages du procédé de colonnes ballastées

- Diminue les tassements de fondations
- Augmente la portance du sol et donc réduit les dimensions des semelles
- Augmente les raideurs du sol
- Augmente l'angle de frottement du sol
- Draine et accélère la consolidation des sols
- Supprime le risque de liquéfaction
- Stabilise les talus
- Permet des constructions sur remblai
- Permet la construction sur semelles superficielles
- Empêche le "lateral spreading" en cas de séisme.

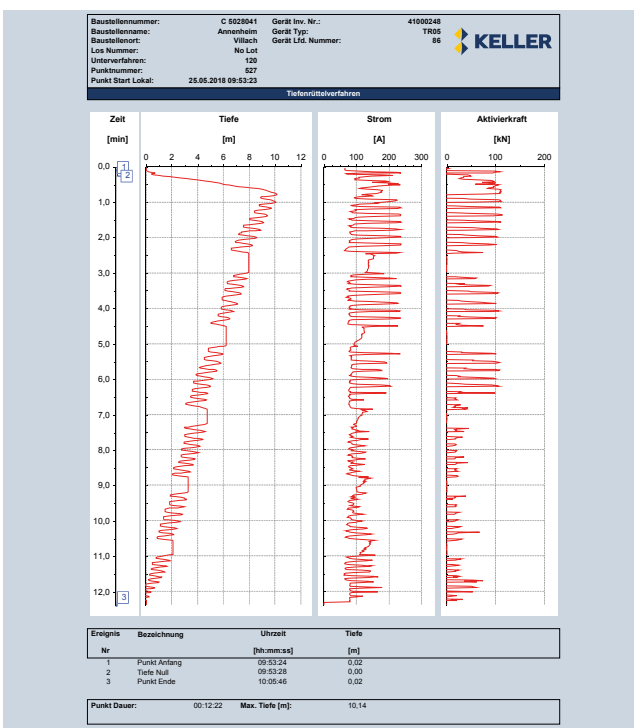
# Contrôle qualité et assurance qualité

Pour toutes ces techniques, des enregistrements électroniques des paramètres de travail permettent de vérifier une qualité constante en temps réel lors des opérations.



## Résultat des mesures

Pendant le compactage, différents paramètres se rapportant au site et au travail effectué sont enregistrés automatiquement. Des données telles que la profondeur atteinte, l'heure, la vitesse de pénétration et celle du retrait, la force exercée et l'énergie consommée apparaissent sous forme de graphique sur un écran numérique. On peut donc les imprimer et les enregistrer.

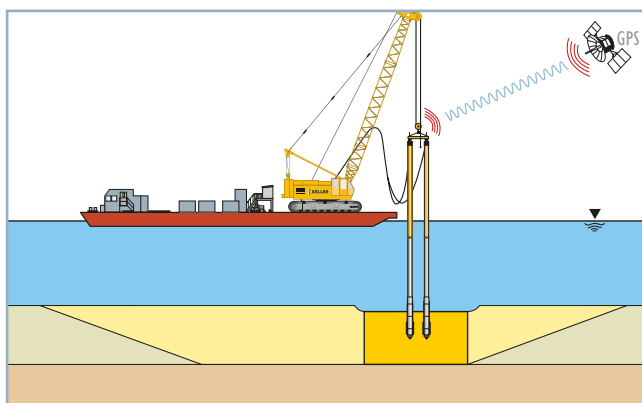




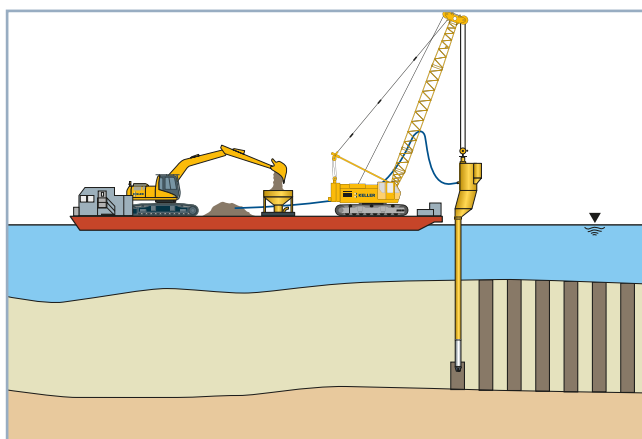
# Utilisations particulières

## Vibrateurs multiples et compactage offshore

Pour procéder au compactage de zones étendues, que ce soit onshore ou offshore, il suffit d'assembler plusieurs vibreurs.



Dans le cas de colonnes ballastées offshore, qu'il s'agisse des murs d'un quai ou des piles d'un pont, on utilise une pompe à gravier spéciale pour construire des colonnes en employant le procédé d'alimentation par sas.



## Colonnes ballastées voie humide

Il est possible de construire des colonnes ballastées dans des sols cohésifs grâce à la méthode par voie humide, avec un vibreur suspendu à une grue. Le lançage à eau assure une pénétration rapide dans le sol. Ce procédé stabilise l'anneau formé autour du vibreur, permettant ainsi l'évacuation des fines, et la création d'un espace destiné à recevoir le gravier. Ce procédé peut être utilisé pour augmenter le diamètre des colonnes ballastées.





## Le nouveau Port de Safi au Maroc

EDans le cadre de la construction du Nouveau Port de Safi, d'importants moyens ont dû être déployés pour permettre la réalisation de colonnes dans des conditions de houle et de vent particulièrement difficiles dans cette zone de l'Océan Atlantique.

Pour permettre la réalisation des digues et du quai charbonnier notamment sur 3 zones reconnues comme compressibles et potentiellement liquéfiables, 23 000 colonnes ballastées (200 000 mètres linéaires au total) ont été réalisées par Keller pour le renforcement des sols constitués de sédiments (sables lâches avec lentilles argilo-limoneuses) jusqu'à des profondeurs variables jusqu'à 38 m de profondeur.



# Project example



## Nouvelle Route du Littoral à Saint-Denis de la Réunion (974)

La Nouvelle Route du Littoral qui vise à remplacer l'actuelle RN1, a été placée en mer, de 80 à 300 mètres du rivage, afin de sécuriser la liaison entre Saint-Denis et La Possession. Ce projet est unique tant par sa longueur (5,4 km) le plus long viaduc en France de ce type) que par sa largeur (près de 30 m), avec un tablier comportant 2 x 3 voies de circulation modulables pour y intégrer un corridor de transport collectif en site propre (tram-train ou bus).

Keller a réalisé une amélioration de sol sous 11 piles du viaduc dont l'assise présentait des caractéristiques géotechniques trop faibles (sable lâche très fin) ou des anomalies géotechniques (ravine, faille, blocs basaltiques).

Les travaux de vibrocompactage offshore avec apport de matériaux 40/80mm, ont été réalisés à partir d'un ponton équipé d'une grue de 250 T et d'un vibreur Keller S340 avec positionnement GPS. Au total 2650 colonnes ont été réalisées pour près de 80 000 m<sup>3</sup> traités et plus de 8300 m<sup>3</sup> incorporés. Les travaux se sont déroulés de novembre 2016 à mai 2017.



## **Keller Group plc**

Entreprise spécialisée dans les travaux  
géotechniques  
[www.keller.com](http://www.keller.com)